



**Modelação da evapotranspiração com o modelo SIMDualKc:
Aplicação à rega de fruteiras, a consociações de culturas e a condições
salinas, e ligação ao SIG para análise à escala do projecto de rega**

Ricardo Granés Tavares Duarte Rosa

Orientadores:

Professor Doutor Luís Alberto Santos Pereira

Doutora Paula Cristina Santana Paredes

TESE ELABORADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA DOS
BIOSSISTEMAS

2018



Modelação da evapotranspiração com o modelo SIMDualKc: Aplicação à rega de fruteiras, a consociações de culturas e a condições salinas, e ligação ao SIG para análise à escala do projecto de rega

Ricardo Granés Tavares Duarte Rosa

Orientadores:

Professor Doutor Luís Alberto Santos Pereira
Doutora Paula Cristina Santana Paredes

TESE ELABORADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA DOS BIOSISTEMAS

Júri

Presidente:

Doutor Ricardo Manuel de Seixas Boavida Ferreira
Professor Catedrático, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa

Vogais:

Doutor Vicente de Seixas e Sousa
Professor Associado, Escola de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Doutor Luís Leopoldo de Sousa e Silva
Professor Auxiliar com agregação, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora

Doutor Mário Manuel de Miranda Furtado Campos Cunha
Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto

Doutora Maria Teresa Gomes Afonso do Paço
Professora Auxiliar, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa

Doutora Paula Cristina Santana Paredes
Bolsista Pós-Doutoramento, Fundação para a Ciência e Tecnologia

Instituições financiadoras:
Fundação para a Ciência e Tecnologia, bolsa SFRH/BD/76635/2011

2018

Agradecimentos

Dedico esta tese àqueles para os quais, o sofrimento porque passei para terminá-la, seria uma bênção nas suas vidas.

Também a dedico aos meus amores, Ana, Sara e Alice, em quem sempre pensei nas alturas mais difíceis. Obrigado por existirem e fazerem parte da minha vida.

Agradeço aos meus pais, sempre presentes e prontos para ajudar, muito obrigado.

Ao Professor Luis Santos Pereira, meu orientador de doutoramento, um obrigado pelo saber que me transmitiu e pelas pontes que construiu para a troca de conhecimentos.

À minha colega e orientadora de doutoramento Paula Paredes, trabalhadora incansável e que sempre me ajudou quando necessitei, os meus sinceros agradecimentos.

Ao Manuel Ferreiro que se prontificou a auxiliar-me para terminar a tese quando a minha vista já pouco via a luz lá à frente do túnel.

Também agradeço ao Professor Rui Marçal a quem recorri muitas vezes e que sempre me recebeu para esclarecimento de dúvidas.

Por fim agradeço ao meu corpo, à minha mente e à minha alma por não me abandonarem quando mais deles precisei.

Resumo

Testou-se a capacidade do modelo SIMDualKc para a modelação do uso da água e da evapotranspiração cultural (ET_c) em cobertos lenhosos descontínuos, em consociações de culturas e em condições transitórias de salinidade do solo. Foi também efectuada a ligação do SIMDualKc a um SIG, no sentido de associar as capacidades de modelação do primeiro às de geoprocessamento e mapeamento do segundo, fazendo uso da detecção remota (DR) para o cálculo da transpiração das culturas (T_c) por via do coeficiente cultural de base (K_{cb}).

O modelo simulou correctamente as dinâmicas do teor de água do solo (SWC) observado em pomares de pereira ‘Rocha’ e de limoeiro regados por microrega na presença de uma toalha freática superficial, em consociações trigo-milho e trigo-girassol regados por canteiros de nível e com uma toalha freática a pouco profundidade, e em milho e sorgo sacarino regados por microrega em condições variáveis de salinidade do solo e em condições não salinas.

Estes resultados demonstraram que o modelo é capaz de estimar correctamente o uso da água, a ET_c e a partição desta entre T_c e evaporação do solo (E_s) em cobertos com características aerodinâmicas e de superfície complexas, inclusivamente sob a influência da contribuição de águas subterrâneas. Também demonstram a sua capacidade em prever correctamente as reduções na ET_c e na T_c em condições variáveis de salinidade do solo, podendo assim ser encarado como uma ferramenta útil de apoio à gestão da rega para estes casos.

O sistema SIMDualKc-SIG demonstrou ser capaz de captar os efeitos da distribuição espacial dos solos, das condições climáticas, das culturas e da fracção de cobertura destas (f_c) nos valores da ET_c , T_c , E_s e nas necessidades de rega das culturas ao nível do projecto de rega, para isso contribuindo especialmente o uso de índices de vegetação (IV) obtidos por DR para o cálculo da f_c e um procedimento inovador de interpolação de dados espaciais.

Palavras chave: uso da água, evapotranspiração cultural (ET_c), transpiração das culturas, evaporação do solo, variabilidade espacial da ET_c e da rega.

Abstract

The SIMDualKc performance for modeling crop water use and crop evapotranspiration (ET_c) for incomplete cover woody crops, intercropping systems and transient soil salinity conditions was tested. SIMDualKc was also coupled with a GIS, in order to associate the modeling capabilities of the first one with the geoprocessing and mapping capabilities of the latter, using remote sensing (DR) to calculate crop transpiration (T_c) via the basal crop coefficient (K_{cb}).

The model correctly simulated the observed soil water content (SWC) dynamics in drip irrigated 'Rocha' pear and lemon tree orchards in the presence of a shallow water table, in basin irrigated wheat-maize and wheat-sunflower relay strip intercropping with a shallow water table, and in drip irrigated maize and sweet sorghum under both transient soil salinity and non saline conditions.

These results showed that the model is able to correctly estimate crop water use, ET_c and its partition between T_c and soil evaporation (E_s) for crops with complex aerodynamic and surface characteristics, inclusively under the influence of groundwater contribution. Results also demonstrated the model ability to correctly predict ET_c and T_c reductions under transient soil salinity conditions, and can thus be viewed as a useful tool to support irrigation management decisions for these cases.

The SIMDualKc-GIS system has been able to capture the impacts of the spatial distribution of soils, climatic conditions, crops and their fractional coverage (f_c) on ET_c , T_c , E_s and irrigation requirements values at the irrigation project level, with both f_c computation from remotely sensed vegetation indices (IV) and an innovative procedure for weather data spatial interpolation playing a major role.

Keywords: crop water use, crop evapotranspiration (ET_c), crop transpiration, soil evaporation, spatial variability of ET_c and irrigation.

Notas

O texto da presente tese de doutoramento não foi escrito ao abrigo do Novo Acordo Ortográfico.

Os Capítulos 5 e 6 da tese constituem, respectivamente, os artigos Miao et al. (2016) e Rosa et al. (2016), publicados numa revista de circulação internacional com arbitragem científica do *Institute for Scientific Information* (vd. Referências Bibliográficas), tendo o autor da tese desempenhando um papel de primeira linha na elaboração desses artigos.

O Capítulo 3 corresponde, em grande parte, ao artigo Rosa et al. (2012a), publicado numa revista de circulação internacional com arbitragem científica do *Institute for Scientific Information* (vd. Referências Bibliográficas), acrescido de conteúdo respeitante a novas valências de modelação entretanto implementadas no aplicativo informático a que diz respeito; o autor desta tese teve um papel de primeira linha na elaboração desse artigo.

Os ensaios experimentais descritos no Capítulo 4 da tese foram conduzidos pelo autor, auxiliado por pessoal delegado pelos responsáveis das explorações agrícolas nos trabalhos mais “pesados”.

O autor desta tese não participou nos ensaios experimentais descritos nos Capítulos 5 e 6/artigos homólogos, tendo sido estes conduzidos por equipas das instituições onde trabalham/trabalharam um ou mais co-autores desses artigos.

Índice

Capítulo 1. Introdução.....	2
1.1. Considerações gerais e sumário dos temas tratados	2
1.2. Objectivos	5
Capítulo 2. Revisão Bibliográfica	8
2.1. Nota introdutória	8
2.2. Métodos de estimação in-situ da evapotranspiração cultural	8
2.3. Modelação/estimação indirecta da evapotranspiração cultural	15
2.3.1. Modelos de um compartimento	15
2.3.2. Modelos de múltiplos compartimentos.....	21
2.3.3. Modelos de estimação da evapotranspiração com base em informação obtida por detecção remota.....	26
2.4. Modelação do balanço hídrico do solo.....	30
2.5. Modelação da evapotranspiração em cobertos lenhosos descontínuos	32
2.6. Modelação da evapotranspiração em consociações de culturas	34
2.7. Modelação da evapotranspiração em condições de salinidade do solo.....	36
2.8. Modelação da evapotranspiração, do uso da água e da rega ao nível do projecto de rega; aplicações SIG	39
Capítulo 3. O modelo SIMDualKc	42
3.1. Introdução	42
3.2 Metodologia e base teórica para o desenvolvimento do modelo.....	43
3.2.1. Coeficientes culturais duais	43
3.2.1.1. Coeficiente cultural de base (K_{cb})	44
3.2.1.2. Coeficiente de evaporação do solo (K_e)	46
3.2.2. Ajustamento do K_{cb} à densidade e altura das culturas	47
3.2.3. Cálculo do K_{cb} em consociações de cultura.....	51
3.2.4. Evapotranspiração actual e o coeficiente de stresse (K_s).....	54
3.2.5 Balanço hídrico da camada evaporativa do solo para o cálculo do coeficiente de evaporação do solo.....	56
3.2.6. Balanço hídrico do solo na zona radicular das culturas.....	59
3.3. Descrição do modelo.....	65
3.3.1 Características gerais	65

3.3.2 Estrutura computacional	67
3.3.3. Abordagem seguida para a simulação de práticas de gestão das culturas, do solo e da rega com impacto no K_{cb} , K_e e no balanço hídrico	70
3.3.3.1 Opções de rega	70
3.3.3.2 Cobertura vegetais do solo activas	72
3.3.3.3 Cobertura do solo com inertes (<i>mulches</i>) para redução da evaporação.....	74
3.3.4. Requisitos de dados	76
3.4. Aplicações do SIMDualKc para a modelação da ET_c e do uso da água	79
3.5. Conclusões	82
Capítulo 4. Modelação da evapotranspiração e do uso da água em cobertos lenhosos descontínuos. Aplicação a pomares de pereira ‘Rocha’ e limoeiro	84
4.1. Introdução	84
4.2. Base para a modelação	86
4.2.1. Avaliação da qualidade dos dados meteorológicos	86
4.2.2. Calibração e validação do modelo SIMDualKc	92
4.2.3. Modelação da evapotranspiração com o modelo SIMDualKc	95
4.3. Aplicação a um pomar de pereira ‘Rocha’	96
4.3.1. Caracterização do local e do dispositivo experimental.....	96
4.3.2. Resultados.....	105
4.3.2.1. Calibração e validação do modelo	105
4.3.2.2. Curvas dos coeficientes culturais: K_{cb} , $K_{cb\ act}$, K_e	110
4.3.2.3. Transpiração, evaporação e uso da água	112
4.4. Estudo de caso do pomar de limoeiros	115
4.4.1. Caracterização do local e do dispositivo experimental.....	115
4.4.2. Resultados.....	121
4.4.2.1. Calibração e validação do modelo	121
4.4.2.2. Curvas dos coeficientes culturais: K_{cb} , $K_{cb\ act}$, K_e	125
4.4.2.3. Transpiração, evaporação e uso da água	126
4.5. Conclusões	130
Capítulo 5. Modelação do uso da água, da transpiração e da evaporação do solo em consociações trigo-milho e trigo-girassol em Hetao, bacia do Rio Amarelo ..	132
5.1. Introdução	132

5.2. Materiais e métodos	133
5.2.1. Modelação da ET_c e do uso da água em consociações com o modelo SIMDualKc.....	133
5.2.2. Caracterização do local e dos sistemas de consociação de culturas	136
5.2.3. Calibração e validação do modelo; indicadores de ajustamento	142
5.3. Resultados e discussão	144
5.3.1. Calibração e validação do modelo para as monoculturas	144
5.3.2. Validação do modelo para as consociações de culturas	144
5.3.3. Coeficientes culturais duais e uso da água em trigo, milho e girassol.....	151
5.3.4. Coeficientes culturais duais e uso da água para as consociações	155
5.4. Conclusões	161
Capítulo 6. Avaliação da transpiração, da evaporação do solo e do uso da água em sorgo sacarino e milho sob condições salinas	164
6.1. Introdução	164
6.2. Materiais e métodos	165
6.2.2. Descrição do ensaio experimental	165
6.2.3. O modelo SIMDualKc para a previsão das dinâmicas da água do solo, da transpiração e da evaporação do solo em condições salinas	169
6.2.3. O modelo HYDRUS-1D para a previsão das dinâmicas da água do solo, da transpiração e da evaporação do solo em condições salinas	172
6.2.4. Calibração e validação do modelo SIMDualKc e configuração do modelo HYDRUS-1D	174
6.3. Resultados	177
6.3.1. Calibração e validação dos modelos. Dinâmicas do teor de água do solo.....	177
6.3.2. Coeficientes culturais duais	184
6.3.3. Evaporação do solo e transpiração das culturas sob influência da salinidade e balanço hídrico do solo	187
6.4. Conclusões	191
Capítulo 7. O Sistema SIMDualKc-SIG para a modelação das necessidades hídricas das culturas e apoio à gestão da rega ao nível do projecto.....	194
7.1. Introdução	194
7.2. Integração do SIMDualKc com o SIG	195
7.2.1. Abordagem seguida para a integração.....	195
7.2.2. Bases de dados.....	197

7.3.3. Operações de geoprocessamento	201
7.2.4. Cálculo da f_c e do K_{cb} a partir de índices de vegetação obtidos por detecção remota...	203
7.3.5. Interface gráfica e operação do sistema.....	208
7.3.5. Tipo de resultados.....	210
7.3. Aplicação do sistema ao bloco de rega 10 do projecto de rega <i>Sinistra-Ofanto</i>	213
7.3.1. Caracterização da área em estudo.....	213
7.3.1. Resultados.....	221
7.4. Conclusões	230
Capítulo 8. Conclusões e perspectivas futuras	232
Referências bibliográficas.....	238

Lista de Figuras

Fig. 3.1. Curvas dos coeficientes culturais: coeficiente cultural basal - K_{cb} (linha contínua mais espessa), coeficiente de evaporação do solo - K_e (linha contínua mais tênue) e K_c simples ou médio (linha a tracejado), dado como a média temporal da soma de K_{cb} e K_e , i.e., $K_c = \overline{K_{cb}} + \overline{K_e}$ (adaptado de Pereira, 2004).	43
Fig. 3.2. Fluxograma mostrando os passos necessários para o cálculo da evapotranspiração cultural actual ($ET_{c\ act}$) através da metodologia dos K_c duais (Rosa et al., 2012).	44
Fig. 3.3. Esquema utilizado pelo modelo para o ajustamento do K_{cb} , de acordo com a fração de cobertura do solo (Rosa et al., 2012).	49
Fig. 3.4. Esquema do cálculo de $f_{c\ eff}$ a partir de f_c e β , onde β é o ângulo de inclinação do Sol em relação ao horizonte no período de ET máxima (Allen e Pereira, 2009).	50
Fig. 3.5. Esquema com as principais características do cultivo em linha – largura, altura, e ângulo Γ da linha de cultivo relativamente à direção E-O, usadas no cálculo de HWR (razão entre altura e largura) e de $f_{c\ eff}$ (adaptado de Allen et al. 1998).	50
Fig. 3.6. Esquema de uma consociação de culturas por faixas e com desfasamento temporal no desenvolvimento das duas culturas, em que $f_{r\ dom}$ e $f_{r\ sub}$ são, respectivamente, as fracções do solo cultivadas com a cultura dominante e com a cultura subordinada, e h_{dom} e h_{sub} , respectivamente, as alturas da cultura dominante e subordinada.	53
Fig. 3.7. Relação entre as fracções do solo parcialmente coberto pela cultura, f_c , solo humedecido, f_w , e solo humedecido e exposto à radiação, f_{ew} , para as situações em que o solo é humedecido pela precipitação (a), ou pela rega que apenas humedece parte da superfície do solo (b)	57
Fig. 3.8. Estrutura conceptual do modelo SIMDualKc.	66
Fig. 3.9. Fluxograma do modelo SIMDualKc.	67
Fig. 3.10. Algoritmo central do modelo SIMDualKc	68
Fig. 3.11. Esquema com as opções de gestão da rega do modelo SIMDualKc.	72
Fig. 3.12. Fluxograma para o cálculo da estimativa de K_{cb} da cobertura ativa do solo a partir da sua densidade, fração de solo coberto e altura, e o cálculo do valor combinado de K_{cb} para a cultura e a cobertura ativa do solo.	73
Fig. 3.13. Ajustamento da fracção de solo com cobertura vegetal activa e da sua densidade para os cálculos de K_{cb} e K_e	74
Fig. 3.14 Influência das características do <i>mulch</i> sobre o cálculo de K_e	76

Fig. 4.1. Valores diários da radiação solar de curto comprimento de onda medidos (R_s) e da radiação solar esperada (Allen et al., 2008) em dias de céu limpo (R_{so}).	88
Fig. 4.2. Diagramas de dispersão relacionando os valores de T_{max} , T_{min} , RH_{max} , HR_{min} , R_s , P e u_z medidos na estação do Carrascal com os respectivos valores homólogos regionais, com especificação do declive e da ordenada na origem da recta ajustada aos dados pelo método dos mínimos quadrados e o coeficiente de determinação (R^2).....	90
Fig. 4.3. valores acumulados da diferença entre os valores diários de T_{max} , T_{min} , RH_{max} , HR_{min} , R_s e P medidos na estação do Carrascal e os previstos pelas rectas de regressão apresentadas na Fig 4.2.	91
Fig. 4.4. Localização parcela de pereira ‘Rocha’ onde foram realizados os ensaios e estações meteorológicas circundantes.	96
Fig. 4.5. Valores diários de $T_{máx}$ (—), $T_{mín}$ (—), $HR_{máx}$ (—), H_{rmin} (—), R_s (—), ET_o (—) e precipitação (—) em 2013 e 2014.	98
Fig. 4.6. Evolução da f_{PAR} da cultura da pereira ‘Rocha’ ao longo dos períodos de medições de 2013 e 2014 nas duas árvores anexas à réplica 1 (— , □) e à réplica 2 (-----, △) do dispositivo experimental.	101
Fig. 4.7. Modelo linear ajustado aos pares de valores SWC-gravimétrico vs SWC-sonda, utilizado para a calibração das leituras da sonda no pomar de pereira ‘Rocha’.....	101
Fig. 4.8. Dispositivo experimental utilizado para a medição do teor de água no solo no pomar de pereira ‘Rocha’: tronco das árvores (●), gotejadores(●), tubos de acesso à sonda (⊗); as distâncias indicadas a negrito e a letra normal junto aos tubos, referem-se, respectivamente, ao comprimento de influência de cada tubo e às distâncias entre tubos.	103
Fig. 4.9. Evolução da profundidade da toalha freática ao longo dos ciclos de desenvolvimento da pereira Rocha em 2013 e 2014 para a réplica 1 (— , □) e réplica 2 (-----)(-----, △) do dispositivo experimental.....	104
Fig. 4.10. Desenvolvimento da cobertura vegetal activa (CVA) em termos da sua altura (□), fracção de cobertura do solo - $f_{c\ gcover}$ (-----), e $f_{c\ gcover}$ ajustada aos 25% da superfície total do solo onde a CVA está presente (—).	105
Fig. 4.11. Valores da ASW medidos e simulados pelo modelo calibrado ao longo das estações de desenvolvimento da cultura da pereira ‘Rocha’ analisados, para: a) réplica 1 do dispositivo experimental em 2013; b) réplica 2 em 2013; c) réplica 1 em 2014; e d) réplica 2 em 2014	109
Fig. 4.12. Evolução dos valores de $K_{cb\ crop}$ (.....), $K_{cb\ gcover}$ (- - - -) e $K_{cb\ crop+gcover}$ (—) ao longo das estações de desenvolvimento da cultura da pereira ‘Rocha’ em 2013 e 2014.	110

Fig. 4.13. Evolução do K_{cb} (cultura + CVA) potencial - $K_{cb\ pot}$ (———), do K_{cb} ajustado ao stresse-hídrico - $K_{cb\ adj}$ (.....), do K_e (- - - - -), da P (———) e da rega (———) ao longo das estações de desenvolvimento da cultura da pereira ‘Rocha’ em 2013 e 2014.....	112
Fig. 4.14. Variação da T_{act} (———), E_s (———), CR (———) e P (———) ao longo das estações de desenvolvimento da cultura da pereira ‘Rocha’ em 2013 e 2014.....	114
Fig. 4.15. Localização do pomar de limoeiros onde foram realizados os ensaios e da estação meteorológica anexa à parcela.	115
Fig. 4.16. Valores diários de $T_{máx}$ (———), $T_{mín}$ (———), R_s (———), precipitação (———) e ET_o (———) em 2013 e 2014 (de 01-01 a 31-10) medidos ou calculados (caso da ET_o) na estação da Barreiralva.....	116
Fig. 4.17. Evolução da f_{PAR} no pomar de limoeiros ao longo das estações desenvolvimento de 2013 e 2014 nas duas árvores anexas à réplica 1 (———, □) e à réplica 2 (-----, △) do dispositivo experimental.	119
Fig. 4.18. Recta de regressão, e respectivos parâmetros, ajustada aos pares de valores do SWC medido pelo método gravimétrico e pela sonda, utilizada para a calibração das leituras da sonda no pomar de limoeiros: a) profundidades de 10 a 50 cm; b) profundidades de 60 a 90 cm.	120
Fig. 4.19. Dispositivo experimental utilizado para a medição do teor de água do solo no pomar de limoeiros: tronco das árvores (●), gotejadores(●) e tubos de acesso à sonda (✱); as distâncias indicadas a negrito e a letra normal junto aos tubos, referem-se, respectivamente, ao peso atribuído a cada tubo para o posterior cálculo do SWC ponderado em cada fila e às distâncias entre tubos.....	121
Fig. 4.20. Valores da ASW medidos e simulados pelo modelo calibrado ao longo das estações de desenvolvimento da cultura do limoeiro: a) réplica 1 do dispositivo experimental em 2013; b) réplica 2 em 2013; c) réplica 1 em 2014; e d) réplica 2 em 2014	124
Fig. 4.21. Evolução do K_{cb} potencial - $K_{cb\ pot}$ (———), do K_{cb} ajustado ao stresse-hídrico - $K_{cb\ adj}$ (.....), do K_e (- - - - -), da P (———) e da rega (———) ao longo dos períodos de desenvolvimento da cultura do limoeiro em 2013 e 2014.	126
Fig. 4.22. Variação da T_{pot} (- - - - -), T_{act} (———), E_s (———) e P (———) ao longo dos períodos de desenvolvimento da cultura do limoeiro em: a) 2013; e b) 2014.	128
Fig. 5.1. Esquema da abordagem para o cálculo de: a) K_{cb} em consociações por faixas ($K_{cb\ inter}$) em função dos coeficientes de densidade (K_d) e dos coeficientes culturais de base (K_{cb}) para as culturas dominante (subscrito <i>dom</i>) e subordinada (subscrito <i>sub</i>), com K_d calculado a partir das alturas (h) e das frações de solo cultivado (f_r) para as culturas dominante (subscrito <i>dom</i>) e subordinada (subscrito <i>sub</i>); b) fracção da água extraível sem stress para consociações por faixas (p_{inter}) em função das fracções p para cultura dominante (p_{dom}) e subordinada (p_{sub}), e de $f_{r\ dom}$, $f_{r\ sub}$, $K_{cb\ dom}$ e $K_{cb\ sub}$	134

Fig. 5.2. Valores diários da temperatura mínima (.....) e máxima (—), evapotranspiração de referência (- -) e precipitação (■) em Dengkou, Hetao, durante o período 2010-2012.....	137
Fig. 5.2. Variação temporal da profundidade da toalha freática para as estações de crescimento de 2010 a 2012.....	142
Fig. 5.4. Água disponível no solo (mm) simulada (—) vs. observada (●) para as monoculturas do trigo (a, b), milho (c, d) e girassol (e, f). Os resultados referem-se à calibração em 2010 (a, c, e) e à validação em 2011 (b, d, f).....	146
Fig. 5.5. Comparação das curvas do K_{cb} relativas às culturas do trigo, milho e girassol, com as curvas relativas às consociações: a) trigo-milho (T-M) e b) trigo-girassol (T-G) (ciclo cultural de 2010).....	148
Fig. 5.6. Variação sazonal da água disponível no solo (mm) simulada(—) vs. observada (●) para a consociação trigo-milho (T-M) em 2010 (a) e 2011 (b) e para trigo-girassol (T-G) em 2010 (c) e 2011 (d).	149
Fig. 5.7. ASW observada vs. simulada relativa a: (a) consociação trigo-milho (n = 62), e (b) consociação trigo-girassol (n = 128) (a linha a tracejado corresponde à recta 1:1).	150
Fig. 5.8. Curvas dos coeficientes culturais de base K_{cb} (—) e $K_{cb\ act}$ (— — —), e coeficiente de evaporação do solo K_e (---) para as monoculturas do trigo em 2010 (a) e 2011 (b), do milho em 2010 (c) e em 2011 (d), e do girassol em 2010 (e) e em 2012 (f). Também são apresentadas as curvas de precipitação (l), rega (l) e ascensão capilar (— · ·).....	153
Fig. 5.9. Curvas dos coeficientes culturais de base $K_{cb\ inter}$ (—) e $K_{cb\ inter\ act}$ (— — —), e do coeficiente de evaporação do solo K_e (---) para as consociações trigo-milho em 2010 (a) e 2011 (b), e trigo-girassol em 2010 (c) e em 2011 (d). Também são apresentadas as curvas de precipitação (l), rega (l) e ascensão capilar (— · ·).....	157
Fig. 5.10. Comparação dos resultados dos sistemas de alternância trigo-milho com as médias ponderadas das duas culturas constituintes relativamente à evapotranspiração efetiva, à transpiração efetiva da cultura, e à evaporação do solo para 2010 e 2011: a) alternância trigo-milho, e b) alternância trigo-girassol.....	160
Fig. 5.11. Comparação das produções obtidas em a) trigo e milho em monocultura e em consociação, e b) trigo e girassol em monocultura e em consociação; c) comparação da produtividade da água (WP) das monoculturas com o sistema de consociação.....	160
Fig. 6.1. Temperaturas mínimas (T_{min}) e máximas (T_{max}) diárias, evapotranspiração de referência (ET_o) e precipitação em Alvalade do Sado entre 2004 e 2009.	166

Fig. 6.2. Esquema da fonte de emissores triplos (adaptado de Ramos et al., 2009). O gradiente de concentração salina aumenta da parcela NS para a parcela HS.	167
Fig. 6.3. Equações utilizadas pelo SIMDualKc para cálculo do balanço hídrico do solo, evapotranspiração cultural potencial (ET_c), transpiração potencial (T_c), evaporação do solo (E_s) e transpiração actual ($T_{c\ act}$) pela consideração do coeficiente de stresse K_s (matricial e osmótico) e pela redução de TAW (TAW_{salt}) e de RAW (RAW_{salt}).	170
Fig. 6.4. Teores da água do solo (SWC) observados (■) e simulados pelos modelos SIMDualKc (—) e HYDRUS-1D (—) sob condições não salinas, NS (a, c, e), e salinas HS (b, d, f) ao longo das estações de crescimento de 2004 a 2006 do milho.	179
Fig. 6.5. Teores da água do solo (SWC) observados (■) e simulados pelos modelos SIMDualKc (—) e HYDRUS-1D (—) sob condições não salinas, NS (a, c), e salinas HS (b, d) ao longo das estações de crescimento de 2008 e 2009 do sorgo sacarino.	180
Fig. 6.6. Relação entre o teor de água do solo (SWC) observado e simulado considerando conjuntamente as estações de crescimento e condições de salinidade: a) estimativas do SIMDualKc para o milho; b) estimativas do SIMDualKc para o sorgo; c) estimativas do HYDRUS-1D para o milho; e d) estimativas do HYDRUS-1D para o sorgo (linha a tracejado corresponde à linha 1:1)....	183
Fig. 6.7. Evolução dos valores do K_{cb} (—), $K_{cb\ act}$ (---), K_e (---), precipitação (—), e rega (—) nas parcelas não salinas NS (a, c, e) e salinas HS (b, d, f) ao longo das estações de crescimento de 2004 a 2006 para a cultura do milho.	185
Fig. 6.8. Evolução dos valores do K_{cb} (—), $K_{cb\ act}$ (---), K_e (---), precipitação (—), e rega (—) nas parcelas não salinas NS (a, c) e salinas HS (b, d) ao longo das estações de crescimento de 2008 e 2009 para a cultura do sorgo sacarino.	186
Fig. 6.9. Valores potenciais, ou não salinos (.....), vs. valores actuais (com stresse salino) simulados pelo SIMDualKc (—) e pelo HYDRUS-1D (—) de: (a) evapotranspiração cultural (ET_c e $ET_{c\ act}$), (b) transpiração cultural (T_c e $T_{c\ act}$), e (c) evaporação do solo (E_s) para a cultura do milho entre 2004 e 2006.	189
Fig. 6.10. Valores potenciais, ou não salinos (.....) vs. valores actuais (com stresse salino) simulados pelo SIMDualKc (—) e pelo HYDRUS-1D (—) de: (a) evapotranspiração cultural (ET_c e $ET_{c\ act}$), (b) transpiração (T_c e $T_{c\ act}$), e (c) evaporação do solo (E_s) para a cultura do sorgo sacarino em 2008 e 2009.	190
Fig. 7.1. Novo procedimento para a especificação de valores de MAD para rega deficitária em períodos cujo início e fim são definidos em termos do número de dias após a plantação (DAP).	199
Fig. 7.2. Esquema com as bases de dados espaciais e não espaciais e as respectivas inter-relações.	200

Fig. 7.3. Criação da rede de estações virtuais e interpolação espacial dos dados climáticos das estações reais para as estações virtuais.....	202
Fig. 7.4. Esquema da atribuição a cada parcela do solo e da estação meteorológica mais representativos.....	203
Fig. 7.5. Esquema do cálculo da f_c a partir dos valores actuais dos índices de vegetação (IV) e dos valores mínimos e máximos do IV para uma dada cultura.	205
Fig. 7.6. Barra de ferramentas do sistema SIMDualKc-SIG e as interfaces gráficas.....	210
Fig. 7.7. Exemplo da Tabela de Resultados resultante da aplicação do sistema SIMDualKc-SIG às principais culturas do bloco de rega 10 do projecto de rega Sinistra-Ofanto durante as respectivas estações de crescimento em 2014.....	212
Fig. 7.8. Apresentação dos resultados diários para uma parcela bloco de rega seleccionada.	212
Fig. 7.9. Bloco de rega 10 do projecto de rega <i>Sinistra-Ofanto</i>	213
Fig. 7.10. Evapotranspiração de referência (ET_o) e precipitação diária no bloco de rega 10 no período 2013-2014.....	214
Fig. 7.11. Tipos dos solos (classificação FAO-Nações Unidas) na área do bloco de rega 10.	214
Fig. 7.12. Ocupação cultural do bloco de rega 10.....	217
Fig. 7.13. Criação da rede de estações meteorológicas virtuais para o bloco de rega 10.....	221
Fig. 7.14. Distribuição espacial dos valores anuais da ET_o e da precipitação, e dos valores acumulados da $ET_{c \text{ actual}}$ e da rega para a cultura da vinha (para vinho).	222
Fig. 7.15. Mapa com o K_{cb} médio em Julho de 2013 para a vinha, pessegueiro e olival.....	223
Fig. 7.16. Influência da fracção de cobertura do solo (f_c) obtida por detecção remota nas necessidades de rega das culturas da vinha, pessegueiro, olival, tomate e alcachofra. K_{cb} (—), $K_{cb \text{ act}}$ (- - - -), K_e (- - - -), precipitação (—), e rega (—)	224
Fig. 7.17. Influência da capacidade de armazenamento do solo para a água nas necessidades de rega das culturas da vinha, pessegueiro e olival. K_{cb} (—), $K_{cb \text{ act}}$ (- - - -), K_e (.....), precipitação (—), e rega (—).	225
Fig. 7.18. Distribuição espacial da transpiração actual e da evaporação do solo para a cultura da vinha (para vinho) em 2014.	226
Fig. 7.19. Distribuição espacial da transpiração, evaporação do solo e necessidades de rega no bloco de rega 10 nos anos de 2013 e 2014.....	228
Fig. 7.20. Hidrogramas da procura para a rega no bloco de rega 10 para a estações de crescimento de 2013 e 2014.	228

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Resumo das equações utilizadas no cálculo de K_e (de Allen et al., 1998, 2005b).....	47
Tabela 3.2. Resumo das equações relativas às extensões para o cálculo do coeficiente de evaporação do solo (Allen et al., 2005b).....	58
Tabela 3.3. Cálculo da depleção de água na camada de solo entre $Z_{r,i}$ e $Z_{r,máx}$, em valor absoluto, $D_{r,inf}$ [mm], e relativo, $D_{r,inf\ mm/m}$ [mm m ⁻¹].....	60
Tabela 3.4. Resumo das equações usadas para calcular a ascensão capilar (CR) e a percolação profunda (DP) (Liu et al. 2006).....	62
Tabela 3.5. Parâmetros das equações paramétricas da ascensão capilar para três tipos diferentes de solo, relativamente a uma profundidade radicular de 1.0 metros (Liu et al., 2006).....	63
Tabela 3.6. Resumo das equações usadas para ajustar o número de curva (CN) às condições hídricas do solo antecedentes, AWC_{II} (Allen et al., 2007).....	65
Tabela 3.7. Indicadores da qualidade do ajustamento entre os valores das variáveis simuladas pelo modelo e os valores medidos destas para uma série de estudos que utilizaram o SIMDualKc	81
Tabela 4.1. Proximidade estatística e grau de associação linear entre os valores das variáveis meteorológicas de cada estação e os seus homólogos regionais, avaliados em termos do declive da recta de regressão forçada à origem (b_0) e do coeficiente de determinação (R^2) da regressão linear pelo método dos mínimos quadrados.	89
Tabela 4.2. Propriedades hidráulicas e texturais do solo na parcela de pereira ‘Rocha’ em Freiria, Torres vedras	99
Tabela 4.3. Estádios fenológicos/desenvolvimento da Pereira ‘Rocha’ na parcela estudada	99
Tabela 4.4. Valores iniciais (padrão) e calibrados dos parâmetros da cultura da pereira ‘Rocha’ necessários ao cálculo do K_{cb} para as condições actuais de densidade, da sensibilidade da cultura ao stresse hídrico, do valor do K_{cb} da CVA em condições de cobertura total do solo, dos parâmetros da evaporação do solo e dos parâmetros da ascensão capilar e da percolação profunda.	107
Tabela 4.5. Indicadores da qualidade do ajustamento entre os valores da ASW medida e simulada pelo modelo para a cultura da pereira ‘Rocha’	110
Tabela 4.6. Valores simulados da evaporação (E), transpiração (T) e ascensão capilar (CR) para o pomar de pereira ‘Rocha’ em 2013 e 2014, relativos a dois períodos do ciclo de desenvolvimento e para a totalidade do período de desenvolvimento analisado.	113
Tabela 4.7. Termos do balanço hídrico do solo observados (P e rega) e simulados pelo modelo (ΔASW , CR, $ET_{c,act}$, $T_{c,act}$ e E_s) em 2013 e 2014.....	115
Tabela 4.8. Propriedades hidráulicas e texturais do solo na parcela de limoeiros estudada, em Barreiralva, Mafra.	117
Tabela 4.9. Estádios de desenvolvimento dos limoeiros na parcela estudada.....	118
Tabela 4.10. Valores iniciais (padrão) e calibrados dos parâmetros da cultura do limoeiro necessários ao cálculo do K_{cb} para as condições actuais de densidade, da sensibilidade da cultura ao stresse hídrico, dos parâmetros da evaporação do solo e dos parâmetros da percolação profunda.	122

Tabela 4.11. Indicadores da qualidade do ajustamento entre os valores da ASW medida e simulada pelo modelo para o estudo de caso do pomar de limoeiros	125
Tabela 4.12. Valores acumulados da evaporação do solo (E_s), Transpiração actual ($T_{c\ act}$), transpiração potencial ($T_{c\ pot}$) e rácios $T_{c\ act}/T_{c\ pot}$ e $E_s/ET_{c\ act}$ em duas metades dos períodos de desenvolvimento dos limoeiros em 2013 e 2014.	127
Tabela 4.13. Valores acumulados da precipitação (P), rega, variação da água disponível no solo (ΔASW), e evapotranspiração cultural actual ($ET_{c\ act}$) em duas metades das estações de desenvolvimento dos limoeiros em 2013 e 2014	129
Tabela 4.14. Termos do balanço hídrico do solo observados (Precipitação e rega) e simulados pelo modelo (ΔASW , $ET_{c\ act}$, $ET_{c\ pot}$, $T_{c\ act}$, $T_{c\ pot}$ e E_s) em 2013 e 2014 para o estudo de caso do pomar de limoeiros	129
Tabela 5.1. Propriedades hidráulicas e texturais do solo na área experimental de Dengkou.	138
Tabela 5.2. Datas dos estádios de desenvolvimento das culturas do trigo, milho e girassol.....	139
Tabela 5.3. Altura das culturas (h) e fracção de cobertura (f_c) às datas de início dos estádios de desenvolvimento padrão.....	140
Tabela 5.4. Número de regas e volume total de rega aplicado para cada uma das monoculturas e para as duas consociações.	141
Tabela 5.5. valores iniciais e calibrados dos coeficientes culturais de base (K_{cb}), fração de depleção da água do solo em conforto hídrico (p), parâmetros de evaporação do solo (Z_e , TEW e REW) e parâmetros da ascensão capilar e da percolação profunda.	145
Tabela 5.6. Indicadores da qualidade do ajustamento das previsões da ASW ao longo dos ciclos de desenvolvimento das monoculturas do trigo, milho e girassol referentes à calibração (2010) e à validação (2011 e 2012).	147
Tabela 5.7. Indicadores da qualidade do ajustamento relativos à ASW nas consociações Trigo-Milho e Trigo-Girassol durante os ciclos de desenvolvimento de 2010 e 2011.	151
Tabela 5.8. Componentes simulados do balanço hídrico relativos às monoculturas de trigo, milho e girassol	155
Tabela 5.9. Componentes simulados do balanço hídrico dos sistemas de alternância trigo-milho (W-M) e trigo-girassol (W-S).....	159
Tabela 6.1. Principais características físicas e químicas do solo da estação experimental.	166
Tabela 6.2. Eventos de rega, qualidade da água de rega, teores iniciais de água do solo, condutividade elétrica do extrato de saturação, e desenvolvimento da cultura nas parcelas salinas (HS) e não salinas (NS) durante os períodos experimentais 2004-2006 e 2008-2009	168
Tabela 6.3. Datas dos estádios de desenvolvimento do milho e do sorgo sacarino	169
Tabela 6.4. Parâmetros iniciais (padrão) e calibrados utilizados pelo modelo SIMDualKc.....	175
Tabela 6.5. Indicadores da qualidade do ajustamento entre os valores do teor de água do solo (SWC) simulados pelo SIMDualKc e os observados.	180
Tabela 6.6. Indicadores da qualidade do ajustamento entre os valores do teor de água do solo (SWC) simulados pelo HYDRUS-1D e os observados.	181

Tabela 6.7. Termos do balanço hídrico do solo simulados pelo modelo SIMDualKc para as culturas do milho e do sorgo sacarino nas parcelas muito salinizadas (HS) e não salinas (NS).....	191
Tabela 6.8. Termos do balanço hídrico do solo simulados pelo modelo HYDRUS-1D para as culturas do milho e do sorgo sacarino nas parcelas muito salinizadas (HS) e não salinas (NS).....	191
Tabela 7.1. Dados de entrada na base de dados não espacial do sistema SIMDualKc-SIG	198
Tabela 7.2. Descrição da Tabela de Simulação do sistema SIMDualKc-SIG.....	203
Tabela 7.3. Resultados contidos na Tabela de Resultados	211
Tabela 7.4. Profundidade e máxima disponibilidade de água no solo (TAW) dos solos do bloco de rega 10.....	215
Tabela 7.5. Datas de plantação ou de iniciação das folhas e duração (dias) dos estádios de desenvolvimento para as culturas do bloco de rega 10.	217
Tabela 7.6. Coeficientes culturais em condições de cobertura total ($K_{cb\ full}$), parâmetros para o ajustamento destes às condições actuais de densidade (M_L e $K_{c\ min}$), fracção da depleção da água do solo sem stresse (p), profundidade radicular máxima ($Z_{r\ max}$), altura máxima (h_{max}) e fracção de cobertura (f_c) para as culturas do bloco de rega 10.	219
Tabela 7.7. Especificação do MAD em diferentes períodos das estações de crescimento das culturas da alcachofra, vinha e pessegueiro.	220
Tabela 7.8. Valores acumulados da evapotranspiração actual ($ET_{c\ act}$), transpiração actual ($T_{c\ act}$), evaporação do solo (E_s), rega e precipitação para todas as culturas em 2013 e 2014.	229

Lista de abreviaturas e símbolos

a_{mult}	Coefficiente de escala multiplicativo utilizado para converter os números digitais (DN) das imagens multiespectrais do sensor OLI-Landsat 8 em reflectância
b_{add}	Coefficiente de escala aditivo utilizado para converter os números digitais (DN) das imagens multiespectrais do sensor OLI-Landsat 8 em reflectância
ASW	Água disponível no solo (mm)
ΔASW	Variação da água disponível no solo (mm)
$\%D_{r\ inf}$	Percentagem inicial da depleção de água entre $Z_{r\ máx}$ e $Z_{r, 0}$ (%)
b	Percentagem de redução na produção por unidade de aumento de EC_e (% / $dS\ m^{-1}$)
BD	Base de dados
BREB	Método micrometeorológico ‘razão de <i>Bowen</i> ’ para medição da evapotranspiração
CIA	Camada inercial ou conservativa atmosférica
CDE	Equação de convecção-dispersão para estimação do transporte de solutos
CR_i	Ascensão capilar a partir da toalha freática no dia i (mm)
CVA	Cobertura vegetal activa
$Data_{act}$	Data actual durante a execução do modelo para o cálculo de p_{inter}
$Data_{harv\ dom}$	Data de colheita da cultura dominante
$Data_{plant\ sub}$	Data de plantação da cultura subordinada
$D_{ei, j}$	Depleção da água na camada superficial do solo no fim do dia j para a fracção f_{ewi} (mm)
$D_{ep, j}$	Depleção da água na camada superficial do solo no fim do dia j para a fracção f_{ewp} (mm)
DN	Número inteiro digital utilizado para codificar a radiância nas imagens Landsat
DOS	<i>Dark Object Subtraction</i>
$DP_{ei, j}$	Perda de água por percolação na fracção f_{ewi} da camada evaporativa no dia j (mm)
$DP_{ep, j}$	Perda de água por percolação na fracção f_{ewp} da camada evaporativa no dia j (mm)
DP_j	Percolação profunda, abaixo da zona radicular, no dia j (mm)
$DP_{sup, j}$	Entrada de água no reservatório de solo entre $Z_{r\ máx}$ e $Z_{r, j}$ por drenagem abaixo de $Z_{r, j}$ no dia j (mm)
$DP_{inf, j}$	Saída de água do reservatório de solo entre $Z_{r\ máx}$ e $Z_{r, j}$ por drenagem abaixo de $Z_{r\ máx}$ no dia j (mm)
D_r	Depleção da água do solo na zona radicular (mm)
$D_{r, j}$	Depleção de água na zona radicular no final do dia j (mm)
$D_{r, j-1}$	Depleção de água na zona radicular no final do dia anterior, $j-1$ (mm)
$D_{r\ inf, 0}$	Depleção de água no solo entre $Z_{r\ máx}$ e $Z_{r, 0}$ no dia 0 (zero) (mm)
$D_{r\ inf\ j}$	Depleção de água no solo entre $Z_{r\ máx}$ e $Z_{r, 0}$ em valor absoluto no dia j (mm)

$D_{r \text{ inf mm/m, 0}}$	Depleção de água no solo entre $Z_{r \text{ i}}$ e $Z_{r \text{ máx}}$ em valor relativo no dia 0 (mm m^{-1})
$D_{r \text{ inf mm/m j-1}}$	Depleção de água entre $Z_{r \text{ i}}$ e $Z_{r \text{ máx}}$ em valor relativo no fim do dia j-1 (mm m^{-1})
$D_{r \text{ inf mm/m, j}}$	Depleção de água entre $Z_{r \text{ i}}$ e $Z_{r \text{ máx}}$ em valor relativo no fim do dia j (mm m^{-1})
DR	Detecção remota
D_{WT}	Profundidade da toalha freática (m)
EC	Método micrometeorológico das flutuações instantâneas (<i>Eddy Covariance</i>) para medição da evapotranspiração
EC_e	Condutividade eléctrica do extracto de saturação do solo (dS m^{-1})
$EC_e \text{ threshold}$	Valor específico de EC_e acima do qual a cultura entra em stresse devido à sua sensibilidade à salinidade (dS m^{-1})
$E_{i,j}$	Evaporação do solo a partir da fracção f_{ewi} no dia j (mm)
$E_{p,j}$	Evaporação do solo a partir da fracção f_{ewp} no dia j (mm)
E_s	Evaporação do solo (mm)
ET_o	Evapotranspiração de referência (mm)
$ET_{o \text{ 24h}}$	Evapotranspiração de referência (utilizando a luzerna como cultura de referência) para períodos de tempo de 24 horas (mm d^{-1})
ET_c	Evapotranspiração cultural (mm)
$ET_{c,j}$	Evapotranspiração cultural no dia j (mm)
$ET_{c \text{ act}}$	Evapotranspiração cultural actual ou real (mm)
$ET_{c \text{ act inst}}$	Evapotranspiração actual instantânea (à hora da passagem do satélite) (mm h^{-1})
$ET_{c \text{ act 24h}}$	Evapotranspiração actual para períodos de tempo de 24 horas (mm d^{-1})
f_c	Fracção da superfície do solo coberta ou sombreada pela cultura (-)
$f_{c \text{ eff}}$	Fracção da superfície do solo efectivamente coberta ou sombreada pela cultura (-)
$f_{c \text{ eff gcover}}$	Fracção da superfície do solo efectivamente coberta pela cobertura vegetal activa (-)
$f_{r \text{ gcover}}$	Fracção da superfície do solo onde a cobertura vegetal activa está presente
f_{ew}	Fracção da superfície do solo humedecida e exposta à radiação solar (-)
f_{ewi}	Fração de solo humedecida tanto pela rega como pela precipitação (-)
f_{ewp}	Fração de solo humedecida apenas pela precipitação (-)
$f_{r \text{ dom}}$	Fracção da superfície do solo cultivada com a cultura dominante (-)
$f_{r \text{ mulch}}$	Fração de solo coberto pelo <i>mulch</i> plástico (-)
$f_{r \text{ sub}}$	Fracção da superfície do solo cultivada com a cultura subordinada (-)
f_w	Fracção da superfície do solo humedecida pela rega ou pela precipitação (-)
h	Altura da cultura (m)
h	Potencial da água do solo (cm)
h_{50}	Pressão para a qual a extracção de água pelas raízes é reduzida em 50% (cm)

h_{canopy}	Altura das plantas em cultivo por linhas (m)
h_{dom}	Altura da cultura dominante da consociação (m)
h_{sub}	Altura da cultura subordinada da consociação (m)
h_{max}	Altura máxima de uma cultura ou de uma cobertura vegetal activa
HWR	Razão entre a altura e a largura das linhas de plantas (-)
H	Densidade do fluxo de calor sensível ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
H_c	Densidade do fluxo de calor sensível a partir do copado (W m^{-2})
H_s	Densidade do fluxo de calor sensível a partir do solo (W m^{-2})
I_j	Dotação líquida de rega no dia j (mm)
K_c	Coeficiente cultural
$K_{c \text{ act}}$	Coeficiente cultural actual
$K_{c \text{ inst}}$	Coeficiente cultural instantâneo (à hora da passagem do satélite)
K_{cb}	Coeficiente cultural de base
$K_{cb \text{ ini}}$	Coeficiente cultural de base no estágio inicial de desenvolvimento da cultura
$K_{cb \text{ mid}}$	Coeficiente cultural de base no período médio de desenvolvimento da cultura
$K_{cb \text{ end}}$	Coeficiente cultural de base no fim do ciclo de desenvolvimento da cultura
$K_{cb \text{ cover}}$	Coeficiente cultural de base da cobertura vegetal activa
$K_{cb \text{ dom}}$	Coeficiente cultural de base da cultura dominante da consociação
$K_{cb \text{ (crop+gcover)}}$	Coeficiente cultural de base conjunto da cultura e da cobertura vegetal activa
$K_{cb \text{ full}}$	Coeficiente cultural em condições de cobertura total do solo
$K_{c \text{ max}}$	Valor máximo do coeficiente cultural em qualquer coberto vegetal
$K_{c \text{ min}}$	Valor mínimo do coeficiente cultural em condições de solo não vegetado
$K_{c \text{ pond}}$	Coeficiente cultural ponderado para consociações de culturas
$K_{cb \text{ sub}}$	Coeficiente cultural de base da cultura subordinada da consociação
$K_{cb \text{ gcover adj}}$	Valor do K_{cb} da cobertura vegetal activa ajustado às condições actuais de densidade
$K_{cb \text{ gcover hmax}}$	Valor máximo do K_{cb} da cobertura vegetal activa (função de h_{max}) antes da correcção quanto ao controlo estomático e condições climáticas
$K_{cb \text{ gcover full}}$	Valor máximo do K_{cb} da cobertura vegetal activa obtido pela correcção de $K_{cb \text{ gcover hmax}}$ quanto ao controlo estomático e condições climáticas
K_d	Coeficiente de densidade da cultura
$K_{d \text{ dom}}$	Coeficiente de densidade da cultura dominante da consociação
$K_{d \text{ sub}}$	Coeficiente de densidade da cultura subordinada da consociação
$K_{d \text{ crop}}$	Coeficiente de densidade de uma cultura com cobertura vegetal activa na entrelinha
$K_{d \text{ gcover}}$	Coeficiente de densidade da cobertura vegetal activa
K_e	Coeficiente de evaporação do solo

K_r	Coeficiente de redução da evaporação do solo
K_{ri}	Coeficiente de redução da evaporação para as fracção f_{ewi}
K_{rp}	Coeficiente de redução da evaporação para a fracção f_{ewp}
K_s	Coeficiente de stresse
K_{ti}	Proporção da transpiração extraída das fracções f_{ewi}
K_{tp}	Proporção da transpiração extraída das fracções f_{ewp}
K_y	Factor de resposta da produção à quantidade de água
λ	Parâmetro de tortuosidade/conectividade dos poros (-)
LAI	Índice de área foliar ($m^2 m^{-2}$)
NDVI	Índice de vegetação (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)
L_R	Domínio radicular (m)
NIR	Banda espectral do infravermelho próximo
p	Fracção da depleção da água do solo em conforto hídrico ou sem stresse hídrico (-)
p_l	Coeficiente empírico adimensional (-)
p_{dom}	Fracção da depleção da água do solo sem stresse para a cultura dominante (-)
p_{sub}	Fracção da depleção da água do solo sem stresse para a cultura subordinada (-)
p_{inter}	Fracção da depleção da água do solo sem stress em consociações (-)
p_{salt}	Fracção da depleção da água do solo sem stress corrigido para condições salinas (-)
P	Precipitação (mm)
P_j	Precipitação no dia j (mm)
$P_j - RO_j$	Precipitação efetiva no dia j (mm)
RAW	Água facilmente disponível no solo (mm)
RAW_{salt}	Água facilmente disponível no solo em condições salinas (mm)
REW	Água facilmente evaporável (mm)
RH_{min}	Humidade relativa mínima (%)
$R_{L up}$	Radiação de longo comprimento de onda emitida pela superfície ($W m^{-2}$)
R_{nc}	Radiação líquida disponível para o copado ($W m^{-2}$)
R_{ns}	Radiação líquida disponível para o solo ($W m^{-2}$)
$R_{n 24h}$	Radiação líquida disponível à superfície para períodos de 24 horas ($MJ m^{-2} d^{-1}$)
RO_j	Escoamento superficial da água não infiltrada no solo no dia j (mm)
S	O termo da extracção radicular da equação de Richards
SAVI	Índice de vegetação (<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i>)
$S_p(z, t)$	Volume potencial de água removida por unidade de volume de solo e por unidade de tempo ($cm^3 cm^{-3} d^{-1}$)
$S(h, h_\theta, z, t)$	Volume actual de água removida por unidade de volume de solo e por unidade de

	tempo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$)
SCF	Factor de Cobertura do Solo (-)
SCLT	Método micrometeorológico da Cintilometria de medição da evapotranspiração
SRA	Método micrometeorológico da Análise da Renovação na Superfície (<i>Surface Renewal Analysis</i>) de medição da evapotranspiração
SWC	Teor de água no solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
t	Tempo (d)
TAW	Máxima disponibilidade de água do solo (mm)
TAW _{salt}	Máxima disponibilidade de água do solo em condições salinas (mm)
TAW _{Z_r máx}	Disponibilidade máxima de água no solo até à profundidade radicular máxima (mm)
T	Transpiração de uma cultura ou da vegetação natural (mm)
TEW	Total de água evaporável (mm)
$T_{ei,j}$	Extracção radicular a partir da fracção f_{ewi} da camada evaporativa do solo no dia j (mm)
$T_{ep,j}$	Extracção radicular a partir da fracção f_{ewp} da camada evaporativa do solo no dia j (mm)
T _c	Transpiração da cultura (mm)
T _{c act}	Transpiração cultural actual ou real (mm)
T _{c pot}	Transpiração cultural potencial ou máxima (mm)
T _{CVA}	Transpiração da cobertura vegetal activa
T _{s rad}	Temperatura radiométrica de superfície (K)
T _{s rad conj}	Temperatura radiométrica de superfície conjunta (K)
T _{rad soil}	Temperatura radiométrica do solo (K)
T _{rad veg}	Temperatura radiométrica do copado (K)
u ₂	Velocidade do vento medida a 2 metros de altura (m s^{-1})
VR	Banda espectral do vermelho
W	Coeficiente de ponderação para a partição da energia disponível pelas fracções f_{ewi} e f_{ewp}
W _a	Armazenamento actual de água na zona radicular (mm)
W _c	Armazenamento crítico de água na zona radicular (mm)
W _s	Armazenamento uniforme de água na zona radicular (mm)
z	Coordenada espacial vertical (cm)
Z _e	Profundidade da camada evaporativa do solo (m)
Z _r	Profundidade radicular (m)
Z _{r, 0}	Profundidade radicular no início do cálculo do balanço hídrico do solo (mm)
Z _{r act}	Profundidade radicular actual (m)
Z _{r, j}	Profundidade radicular no final do dia j (m)
Z _{r, j-1}	Profundidade radicular no final do dia anterior, j-1 (m)

Símbolos em Grego

α	parâmetro de forma do modelo de van Genuchten-Mualem (cm d^{-1})
$\alpha_1(h)$	redução na absorção de água pelas raízes devido ao stress hídrico
$\alpha_2(h_0)$	redução da extracção de água pelas raízes devido ao stress salino
$\alpha(h, h_0, z, t)$	função adimensional de resposta ao stress
β	ângulo do sol acima do horizonte
$\beta(z, t)$	função de distribuição da densidade radicular normalizada (cm^{-1})
Δ	Fracção de evaporação
Δ_{inst}	Fracção de evaporação instantânea (à hora da passagem do satélite)
ε_L	dispersividade longitudinal (cm)
η	parâmetro de forma do modelo de van Genuchten-Mualem (-)
θ_{FC}	Teor de água do solo à capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
θ_r	teor de água do solo residual ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
θ_s	Teor de água do solo à sturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
θ_{WP}	Teor de água do solo no coeficiente de emurchecimento ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
$\theta_{\text{WP salt}}$	Teor de água do solo no ponto de emurchecimento em condições salinas ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
θ_z	Ângulo zenital solar
λ	Comprimento de onda da radiação electromagnética (μm)
λ_w	Calor latente de vaporização da água (J Kg^{-1})
$\lambda_w E$	Densidade do fluxo de calor latente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
$\lambda_w E_c$	Densidade do fluxo de calor latente a partir do copado (W m^{-2})
$\lambda_w E_s$	Densidade do fluxo de calor latente a partir do solo (W m^{-2})
ρ	Reflectância
ρ_{haze}	Reflectância aparente causada por difusão atmosférica da radiação solar
$\rho_{\text{haze } i}$	Reflectância aparente na banda i causada por difusão atmosférica da radiação solar
$\rho_{\text{haze VR}}$	Reflectância aparente na banda espectral do vermelho causada por difusão atmosférica da radiação solar
$\rho_s \text{ NIR}$	Reflectância de superfície na banda espectral do infravermelho próximo
$\rho_s \text{ VR}$	Reflectância de superfície na banda espectral do vermelho
$\rho_{\text{TOA band } i}$	Reflectância no topo da atmosfera para a banda espectral i
$\rho_{\text{TOA VR}}$	Reflectância aparente no topo da atmosfera para a banda do vermelho
$\rho_{\text{TOA NIR}}$	Reflectância aparente no topo da atmosfera para a banda do infravermelho próximo
$\omega(t)$	índice de stress hídrico adimensional ou factor de adaptabilidade das raízes (-)
ω_c	valor crítico do índice de stress hídrico (-)

Capítulo 1

Introdução

1.1. Considerações gerais e sumário dos assuntos tratados

Uma programação correcta da rega, recorrendo a métodos que permitam otimizar a oportunidade e a quantidade de rega por forma a maximizar a produtividade económica da água, tem um papel determinante para a sustentabilidade da agricultura de regadio. Assim, tanto no plano económico é a forma de maximizar o retorno económico do agricultor (Pereira, 2007; Rodrigues e Pereira, 2009), como do ponto de vista ambiental, ao minimizar usos não benéficos de água, conduz a uma poupança de água e obvia problemas ligados ao excesso de rega, como sejam a contaminação das águas superficiais e subterrâneas por fertilizantes e pesticidas, e a salinização do solo pela subida de toalhas freáticas salobras (Pereira et al., 2002; Pereira et al., 2009). Embora esta temática seja especialmente importante em regiões onde a água é escassa, nomeadamente nas regiões áridas e semi-áridas, dado as disponibilidades poderem não suprimir plenamente as necessidades hídricas potenciais das culturas e onde seja portanto necessário recorrer a estratégias de rega deficitária, também tenderá a sê-lo em algumas regiões temperadas por via das alterações climáticas, que tenderão a diminuir o rácio disponibilidades/procura (IPCC, 2014), a aumentar a frequência de secas (FAO, 2016) e consequentemente a colocar desafios à produção de bens alimentares (HLPE 2012, 2015; Pereira, 2017). Importa ainda salientar que a programação da rega não pode estar dissociada dos métodos de rega, já que a cada método estão associadas diferentes dotações de rega, que determinam diferentes oportunidades de rega, e que aquela está dependente das limitações dos sistemas de abastecimento em irem ao encontro da programação pretendida (Pereira, 2004).

Embora exista uma grande variedade de métodos para a programação da rega baseados em medições de variáveis fisiológicas (potencial hídrico foliar, fluxo de seiva, condutância ou resistência estomática, variações do diâmetro do tronco, temperatura dos cobertos, etc.), hidrológicas (potencial e teor de água do solo) e micrometeorológicas (para cálculo da evapotranspiração cultural) (Rana e Katerji, 2000; Pereira et al., 2002; Allen et al., 2011), a maioria destes são pouco vocacionados para uma aplicação do ponto de vista operacional. Nasce assim o interesse na modelação das necessidades de água das culturas e a sua consideração em modelos de simulação do balanço hídrico do solo que permitem contabilizar a parte das necessidades hídricas das culturas que terá de ser satisfeita através da rega atendendo a que outra parte será suprida pela precipitação, reserva de água no solo e ascensão

capilar, para além de contabilizar as perdas por escoamento superficial e percolação abaixo da zona radicular. Um requisito essencial dos modelos de programação da rega baseados no balanço hídrico do solo é o conhecimento das necessidades hídricas potenciais das culturas, embora dependam de informação adicional, como a caracterização das propriedades hidráulicas dos solos, nomeadamente para a determinação da capacidade de armazenamento para a água, a profundidade radicular, respostas produtivas das culturas face a determinados limiares do teor de água do solo, práticas de gestão das culturas e do solo e dados relativos ao método de rega.

As necessidades hídricas potenciais das culturas correspondem à designada evapotranspiração cultural potencial (ET_c), isto é, a quantidade de água que, em condições de pleno conforto hídrico, é transferida para a atmosfera sob a forma de vapor a partir dos estomas das plantas (transpiração - T_c) e da superfície humedecida do solo (evaporação - E_s). A ET_c pode ser obtida por métodos de medição directa *in-situ*, como por exemplo, os métodos baseados no balanço hídrico do solo, em lisímetros ou em condições naturais, os métodos micrometeorológicos, como o método das flutuações instantâneas e o da razão de Bowen, e os métodos de medição separada da T_c e da E_s , tais como os métodos baseados no fluxo de seiva e a utilização de microlisímetros (Allen et al., 2011). No entanto, estes métodos não são plausíveis de serem utilizados para a programação da rega a um nível operacional, visto serem pouco expeditos, recorrerem a equipamentos caros e de difícil e cuidadosa construção, e exigirem um elevado grau de conhecimento por parte dos operadores (Paço et al., 2006). São no entanto essenciais para a calibração e validação de modelos de estimação indirecta da ET_c , estes sim mostrando-se mais adequados para aquela finalidade, principalmente quando requerem um conjunto de dados de entrada de obtenção simples e expedita, e quando o investimento em termos da sua parametrização e calibração é moderado. De entre estes métodos, destaca-se pela sua grande divulgação, aplicabilidade prática e fundamentação teórica (Pereira et al., 1999), a utilização combinada da ET_c de uma cultura de referência (ET_o , mm d^{-1}) e de coeficientes culturais (K_c , adimensional) (Doorenbos e Pruitt, 1977; Allen et al., 1998), representando a ET_o o poder evaporativo da atmosfera, calculada apenas com variáveis meteorológicas, e o K_c a integração das características da cultura relacionadas com as resistências aerodinâmica e de superfície, e com a reflexão da radiação solar (albedo), que a distinguem da cultura de referência.

Das duas abordagens que combinam o K_c e a ET_o para a estimação da ET_c , i.e., a simples (ou média) e a dual, reveste-se de particular interesse a segunda, em que o K_c é dividido em duas

componentes, cujo cálculo é feito separadamente (Allen et al., 1998, 2005a): o coeficiente cultural basal (K_{cb}), que descreve a transpiração da cultura (T_c), e o coeficiente de evaporação do solo (K_e), que descreve a evaporação da água a partir da camada superficial humedecida do solo (E_s), este último tomando em consideração as restrições energéticas e hídricas à evaporação. Esta abordagem permite estimar melhor os impactos de factores como a frequência da rega e da precipitação, do método de rega e da utilização de coberturas do solo para controlo da evaporação (*mulches*) no consumo total de água pelas culturas. Por outro lado o cálculo separado da componente de transpiração da cultura, permite que aspectos que têm impacto apenas nessa componente como o stresse hídrico causado por baixos valores do potencial matricial e/ou osmótico sejam mais correctamente contabilizados. Assim, a aproximação dual melhora a capacidade de simulação de práticas de rega deficitária, em que stresses hídricos moderados são deliberadamente impostos tendo em vista critérios de qualidade da produção ou de produtividade económica da água, assim como a avaliação dos impactos da utilização de águas de rega salinas, em que o stress salino é controlado por intermédio de aplicações adicionais de água de rega destinadas à lavagem parcial dos sais que se vão acumulando no solo entre regas sucessivas. Em condições de cobertos descontínuos o K_{cb} pode ser estimado em função da fracção de cobertura (f_c) e da altura da cultura (h , m) (Allen e Pereira, 2009) assim como pela utilização de índices de vegetação obtidos por detecção remota (e.g. Pôças et al., 2015).

Do exposto acima, há todo o interesse em integrar a metodologia dos K_c duais para o cálculo da ET_c num modelo que apoie a gestão da rega. Neste sentido foi desenvolvido o modelo de balanço hídrico do solo SIMDualKc (Rosa et al., 2012a), que a implementa e a conjuga com vários módulos contemplando o cálculo dos K_{cb} a partir da f_c e da altura da cultura, simulação de práticas de gestão do solo (*mulches* e coberturas vegetais activas) e de práticas de gestão das culturas (consociações de plantas), stresses ambientais (salinidade do solo) e extensões hidrológicas para aumentar a capacidade de simulação do balanço hídrico do solo, como sejam a aproximação paramétrica de cálculo da ascensão capilar e da percolação profunda (Liu et al., 2006) e o método do ‘número de curva’ – *curve number* (USDA-SCS, 1972) para estimação do escoamento superficial.

Uma vez que o SIMDualKc foi originalmente desenhado para ser um modelo agregado, no sentido em que não toma em consideração a variabilidade espacial das variáveis e parâmetros das culturas, do solo, clima, águas subterrâneas, as quais são fundamentais para a gestão da água ao nível de um projecto de rega ou em estudos ambientais, foram efectuadas alterações à

sua estrutura e ao código no sentido de conectá-lo a um SIG e a fazer uso de dados obtidos por detecção remota para cálculo dos K_{cb} .

O modelo SIMDualKc foi testado e avaliado em diversas condições incluindo, diferentes tipos de cobertos vegetais, diferentes escalas espaciais, sob a influência de águas subterrâneas e de stresses ambientais. Os seguintes estudos de caso foram considerados, aqui separados de acordo com a escala espacial:

- 1) à escala da parcela, nomeadamente: *a)* em pomares de pereira rocha, influenciados pela presença de toalha freática superficial, e em pomar de limoeiros, ambos regados por microrrega, na freguesia da Freiria, Torres Vedras; *b)* em consociações trigo-milho e trigo-girassol, regados por canteiros, Hetao, Mongólia Interior, China; *c)* milho e sorgo sacarino regados por microrrega com águas de salinidade variável, em Alvalade do Sado, Alentejo;
- 2) à escala do projecto de rega, nomeadamente, no bloco de rega 10 do projecto de rega *Sinistra-Ofanto*, situado na região da Apúlia, sul de Itália, envolvendo uma série de culturas arbóreas, arbustivas, cereais e hortícolas.

1.2. Objectivos

O presente estudo tem pois como objectivo testar algumas das capacidades de modelação do modelo já existentes a casos envolvendo alguma complexidade e para os quais o modelo foi pouco explorado, e alargar a capacidade de modelação do SIMDualKc a situações que ainda não eram contempladas. Assim, e procurando em última instância que o modelo constitua uma ferramenta útil e fiável para apoio à gestão da rega, auxiliando a elaboração de calendários de rega alternativos que diminuam os usos não benéficos da água e aumentem a produtividade física e/ou económica da água, os objectivos específicos deste estudo foram validar o SIMDualKc para a modelação do uso da água, da ET_c e da partição desta entre T_c e E_s para:

- 1) cobertos lenhosos descontínuos, nomeadamente sob a influência da contribuição da ascensão capilar de água a partir de toalhas freáticas pouco profundas e de coberturas vegetais do solo activas;
- 2) consociações de culturas, focando especialmente o caso mais complexo das consociações do tipo *relay strip intercropping*, em que existe um desfasamento temporal no desenvolvimento das duas culturas consociadas;

- 3) condições transitórias de salinidade do solo, com o stresse salino a variar ao longo de cada estação de crescimento e entre estações de crescimento;
- 4) a escala do projecto de rega, por forma a captar os efeitos da distribuição espacial dos solos, das condições climáticas, das culturas e da densidade/fracção de cobertura destas.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1. Nota introdutória

As plantas dependem da água para o seu metabolismo, nomeadamente como fonte de hidrogénio para a produção de hidratos de carbono através da fotossíntese. No entanto apenas cerca de 1% da água absorvida pelas raízes e transportada através da planta é utilizada para aqueles fins, sendo a quase totalidade libertada (perdida) sob a forma de vapor a partir dos estomas das plantas, num processo designado por transpiração. A transpiração da cultura (T_c) pode ser assim vista como o custo que a planta tem de pagar por manter os estomas abertos para a difusão do dióxido de carbono atmosférico, embora seja ela própria o motor para o fluxo de água e nutrientes através do sistema vascular necessários ao metabolismo celular, para além de, por exemplo, regular a temperatura da planta. Em agricultura, para que as plantas expressem todo o seu potencial produtivo, a água deve estar facilmente disponível no solo, i.e., retida a baixos potenciais hídricos, por forma a poder ser absorvida pelas raízes com o menor custo metabólico possível, sendo muitas vezes necessário recorrer-se à rega. Uma vez que a aplicação de água às culturas tanto através da rega como da precipitação humedece a superfície do solo, ocorrem fluxos de vapor do solo para a atmosfera, a designada evaporação do solo (E_s), pelo que a transpiração das culturas não pode ser dissociada da evaporação do solo na quantificação do consumo total de água. Assim nasce o conceito de evapotranspiração máxima (potencial) da cultura - ET_c (Doorenbos e Pruitt, 1977; Allen et al., 1998), i.e., a quantidade de água que, em determinado ambiente e em condições agronómicas óptimas e de plena disponibilidade hídrica do solo, é transferida para a atmosfera sob a forma de vapor a partir dos estomas das plantas - T_c e da superfície humedecida do solo - E_s . O conhecimento da ET_c é fundamental em agricultura, principalmente para o apoio à gestão da rega. A ET_c pode ser medida (em sentido lato) *in-situ* ou remotamente por diferentes tipos de métodos, estimada indirectamente por modelos.

2.2. Métodos de medição *in-situ* da evapotranspiração cultural

Os métodos de medição *in-situ* podem ser divididos em três tipos (Rana e Katerji, 2000; Paço, 2003): métodos hidrológicos, métodos micrometeorológicos e métodos de medição separada das duas componentes da ET_c , i.e., T_c e E_s .

Métodos hidrológicos

Os métodos hidrológicos estimam a ET_c através da determinação *in-situ* dos restantes termos do balanço hídrico do solo, sendo aquela obtida como termo residual, podendo o balanço ser calculado em condições naturais ou com confinamento da zona radicular em lisímetros. O balanço hídrico do solo em condições naturais tem fornecido estimativas da ET_c que são em geral coerentes com as obtidas por outros métodos, tanto em culturas herbáceas como lenhosas, como por exemplo, pela utilização de lisímetros de pesagem (Ding et al., 2010), a razão de Bowen (Malek e Bingham, 1993; Mastrorilli et al., 1998), com as flutuações instantâneas (Wilson et al., 2001; Testi et al., 2004; Li et al., 2008a, 2008b) e com o fluxo de seiva e utilização de micro-lisímetros (Wilson et al., 2001; Gong et al., 2007). Este método apresenta contudo algumas fragilidades como sejam a dificuldade em estimar alguns termos do balanço, como sejam o escoamento superficial, a ascensão capilar e a percolação profunda (Allen et al., 1998; 2011), razão pela qual na maioria dos estudos, caso dos apresentados acima, a ET_c é estimada apenas quando a toalha freática é muito profunda e em períodos onde não exista percolação profunda. Adicionalmente existe a dificuldade em estimar a profundidade do solo que é explorada pelas raízes e em captar/amostrar a heterogeneidade da distribuição vertical e horizontal das raízes assim como do teor de água no solo (Rana et al., 2005; Petillo e Castel, 2007).

A utilização de lisímetros para a medição da ET_c , onde o sistema radicular das plantas está confinado a um tanque e totalmente isolado da sua vizinhança, permite obviar alguns dos problemas do método anterior, uma vez que se consegue medir com maior precisão a parte da precipitação e da rega que efectivamente se infiltra no solo e a percolação profunda, embora normalmente esteja limitada a situações de ascensão capilar nula. Assim, por exemplo, com a utilização de lisímetros de pesagem, em que a ET_c é calculada como resultado da alteração de massa ocorrida no sistema durante um certo intervalo de tempo, depois de deduzidas as eventuais perdas por percolação, são conseguidas estimativas da ET_c com precisão de centésimas de milímetro (Allen et al., 1998, 2011). No entanto algumas fragilidades podem ser apontadas ao uso deste método, como sejam a dificuldade em reproduzir fielmente as condições físicas e agronómicas da parcela, nomeadamente em conseguir que a parte aérea das plantas no lisímetro seja perfeitamente homogénea em relação à da sua vizinhança, e que os sistemas radiculares e as características físicas do solo traduzam fidedignamente as do exterior (Goldhamer et al., 1999; Girona et al., 2002). No entanto, a utilização de lisímetros de pesagem é largamente aceite como o método padrão de medição da ET_c (Jia et al., 2006;

Shuttleworth, 2008; Ding et al., 2010), contra o qual se comparam estimativas por outros métodos, sendo amplamente utilizado para o cálculo da ET_c e derivação de coeficientes culturais (K_c), nomeadamente em culturas herbáceas (Wright, 1991; Tyagi et al., 2000; Kashyap e Panda, 2001; Liu et al., 2002; Benli et al., 2006; Marek et al., 2006; Bryla et al., 2010; Liu e Luo, 2010; Akhand et al., 2014), cereais (López-Urrea et al., 2014, 2016), e em lenhosas (Gironna et al., 2002, 2003; Ayers et al., 2003; Johnson et al., 2000, 2005; López-Urrea et al., 2012).

Métodos micrometeorológicos

Os métodos micrometeorológicos recorrem à medição de alta frequência de grandezas físicas num ou mais níveis dentro da camada inercial ou conservativa atmosférica (CIA) acima do coberto para, de forma directa ou mais indirectamente, calcular os fluxos de calor latente ($\lambda_w E$) (i.e., a ET em termos energéticos) e sensível (H) entre os cobertos vegetais e uma determinada altura na CIA. De natureza mais directa destacam-se aqui os métodos da ‘Razão de Bowen’ (*Bowen Ratio Energy Budget*) - *BREB* e o das ‘Flutuações Instantâneas’ (*Eddy Covariance*) - *EC*, em que $\lambda_w E$ é calculado com base: 1) *BREB*: na equação do balanço de energia, com medição da radiação líquida (R_n), do fluxo de calor do solo (G) e do rácio entre os gradientes de temperatura e humidade específica na CIA (razão de Bowen - β); e 2) *EC*: na covariância dos pares velocidade vertical do vento e humidade absoluta do ar (sendo neste caso $\lambda_w E$ calculado directamente) ou velocidade vertical do vento e temperatura do ar (calculando H e resolvendo depois o balanço de energia em ordem a $\lambda_w E$). Nos métodos em que $\lambda_w E$ é calculada de forma mais indirecta destacam-se o método da ‘Análise da Renovação na Superfície’ (*Surface Renewal Analysis*) - *SRA* e o método da ‘Cintilometria’ (*Scintillometry*) - *SCLT*, em que $\lambda_w E$ é calculado com base: 1) *SRA*: na identificação e caracterização de episódios designados por ‘rampas’, em que parcelas de ar frio ao entrarem em contacto com o coberto sofrem um aumento gradual de temperatura que cessa abruptamente por renovação das parcelas entretanto aquecidas por novas parcelas de ar frio, calculando H em função do quociente entre a magnitude do aumento da temperatura e a duração da ‘rampa’ e sendo $\lambda_w E$ calculado como o termo residual do balanço de energia; 2) *SCLT*: na proporcionalidade entre a magnitude das cintilações atmosféricas de um feixe de radiação electromagnética e a magnitude das flutuações da temperatura do ar, do relacionamento destas últimas com os parâmetros da teoria da estabilidade atmosférica de Monin-Obukhov para cálculo de H, sendo finalmente $\lambda_w E$ calculado como o termo residual do balanço de energia.

O principal requisito dos quatro métodos é garantir que a distância do local de medição ao extremo da parcela na direcção dos ventos dominantes (o designado *fetch*) é extensa o suficiente para que possam ser desprezados os gradientes horizontais de temperatura e humidade, por forma a assegurar que os fluxos medidos sejam realmente libertados pela superfície em estudo, ou pelo menos que, em condições de *fetch* limitante, se conheça a zona de onde os fluxos medidos são maioritariamente provenientes (análise da ‘pegada’ do fluxo), por forma a rejeitar medições feitas quando o vento não é oriundo dessa direcção (Paço et al., 2006; Allen et al., 2011). Todos os métodos apresentam ainda algumas limitações em cobertos descontínuos, especialmente quando lenhosos, uma vez que nestes, fruto da sua elevada altura, rugosidade e existência de porções de solo descoberto, verificam-se variações importantes das condições microclimáticas nos planos horizontal e vertical que originam fenómenos localizados de advecção que podem distorcer pontualmente os valores medidos (Paço, 2003).

O método das flutuações instantâneas tem sido amplamente utilizado para a medição da ET_c , produzindo resultados concordantes com os obtidos por outros métodos, tal como anteriormente referido, em estudos em que estas medições são comparadas com o método do balanço hídrico do solo, com o método da razão de Bowen (Shi et al., 2008; Li et al., 2008; Wolf et al., 2008) e com medições em lisímetros (Chávez et al., 2009; Ding et al., 2010; Gebler et al., 2015; Alfieri et al., 2012). No entanto existe uma clara e sistemática subestimação dos fluxos de calor sensível e latente relativamente à energia disponível, tal como verificado em todos os estudos referidos acima. Este facto é particularmente notório aquando da comparação com medições da ET_c por lisimetria, produzindo valores da ET_c inferiores aos obtidos por este último método, razão pela qual o fecho da equação do balanço de energia é muitas vezes forçado, repartindo o erro de fecho do balanço entre $\lambda_w E$ e H ponderado pela razão de Bowen (Allen et al., 2011).

As medições da ET_c pelo método da razão de Bowen mostram-se consistentes com as obtidas com outros métodos, tal como referido atrás na comparação com o método do balanço hídrico do solo e com as flutuações instantâneas, sendo também concordantes com medições em lisímetros (Blad e Rosenberg, 1974; Todd et al., 2000; Hatfield et al., 1997; Gavilán e Berengera, 2007). No entanto o método revela-se problemático para medir a ET_c durante o amanhecer e o anoitecer, alturas em que se dá a inversão do sentido dos fluxos de calor, ficando frequentemente os gradientes de temperatura com sinal oposto aos dos de humidade, produzindo valores de $\beta \approx -1$. Também durante a rega ou a precipitação, o método torna-se

impreciso, uma vez que os gradientes de humidade são muito baixos e próximos do limite de resolução dos sensores (Allen et al., 2011).

Quanto ao método da renovação na superfície, vários estudos, nomeadamente em olival (Castellví e Martínez-Cob, 2005), em trigo e arroz (Zhao et al., 2010), em arroz (Castellví et al., 2006), em pastagem de gramíneas (Castellví et al., 2008) e em vinha (Spano et al., 2000) evidenciam a coerência entre as estimativas de H e λE obtidas com este método e as obtidas pelo método das flutuações instantâneas.

O método da cintilometria (*SCLT*) tem produzido em vários estudos medições da ET_c bem correlacionadas com as de outros métodos micrometeorológicos, sobretudo o método EC, como sejam os de: 1) Hoedjes et al. (2007), num olival em Marrocos, que refere uma boa correlação entre os dois métodos especialmente nos períodos entre regas; 2) Ezzahar et al. (2009), em Marrocos, que relatou uma boa aderência entre as estimativas da ET_c pelos dois métodos para as culturas da oliveira, trigo de inverno e laranjeira, sobretudo no período entre regas, em que as condições de humidade do solo são mais homogéneas; 3) Schuttemeyer et al. (2006), em dois locais no Gana, um com pomares de cajueiro consociados com milho e outras gramíneas, e outro com pastagem e árvores dispersas, também referiu uma boa concordância dos valores obtidos pelos dois métodos, tendo no entanto verificando uma ligeira tendência para a *SCLT* sobrestimar H e subestimar $\lambda_w E$ relativamente a EC; e 4) Savage (2009), na África do Sul, em pastagem mista, que constatou uma boa concordância entre as estimativas de H e $\lambda_w E$ obtidas com *SCLT* e pelos métodos EC e *BREB*.

Métodos de medição separada da transpiração da cultura e da evaporação do solo

Nos métodos de medição separada das componentes da ET_c , destacam-se quanto à medição da componente T_c , os métodos baseados no fluxo de seiva e a utilização de mini- ou micro-lisímetros para a medição da evaporação de água do solo (E_s). Existem adicionalmente outros métodos de medição da E_s como por exemplo pela diferença entre a ET_c e T_c , a medição por isótopos estáveis ou as câmaras de medição de fluxos de gases.

Os métodos de medição da T_c baseados no fluxo de seiva são na sua grande maioria baseados no transporte de calor pela seiva, podendo esse calor ser aplicado no xilema de forma contínua ou intermitente. No caso do calor ser aplicado de forma contínua, destacam-se três métodos (Paço, 2003): 1) os métodos de balanço de calor, que fazem o cálculo do balanço energético de um certo volume do caule a que foi aplicado calor, sendo o fluxo de seiva estimado como o termo residual que é perdido por convecção; 2) o método de deformação do

campo de temperaturas, que relaciona o fluxo de seiva com a forma diferenciada que o campo de temperaturas apresenta para diferentes intensidades do fluxo; e 3) o método de dissipação de calor ou método de *Granier*, que relaciona o fluxo de seiva com a diferença de temperatura entre dois sensores inseridos radialmente no tronco de uma árvore, com um certo afastamento vertical, sendo o de cima aquecido.

Nos métodos em que a fonte de calor é intermitente destaca-se o método da velocidade dos impulsos de calor (Edwards et al., 1996), em que a densidade do fluxo de seiva é relacionada com o tempo necessário para que o calor aplicado num determinado ponto e transportado por convecção através do xilema faça com que a temperatura de sensores situados acima desse ponto iguale a dos sensores colocados abaixo e mais próximos dele, ou numa aproximação alternativa, com o tempo que é necessário para que um sensor colocado a uma determinada distância do ponto de aplicação de calor e no sentido da deslocação do fluxo, atinja a temperatura máxima (Paço, 2003).

Uma revisão mais aprofundada destes métodos, nomeadamente a referência a estudos em que são utilizados, não é pertinente no presente estudo, podendo ser consultada por exemplo em Paço (2003), mencionando-se aqui apenas as aplicações do método de *Granier*, dado ser o método com maior divulgação e com maior número de estudos, nomeadamente em Portugal.

Em vários estudos, o método de *Granier* (Granier, 1985) tem produzido estimativas de T_c consistentes com as obtidas por métodos de balanço de calor, como em Ferreira et al. (2006) para o pessegueiro, Kostner et al. (1998) em floresta de abetos e Kostner et al., (1998b) em pinheiro escocês. Também quando comparado com o método das flutuações instantâneas, o método de *Granier* revelou produzir estimativas de T_c concordantes com aquele, tal como nos estudos de Saugier et al. (1997) em floresta boreal, Granier et al (2000) em faia e Kostner et al. (1992) em *Nothofagus* (faias do sul). No entanto, outros estudos comparativos existem em que o método de *Granier* subestima claramente T_c . Assim, Lundblad *et al.* (2001), num estudo em pinheiros e abetos, constatou que o método de *Granier* subestimou em cerca de 50% o fluxo de seiva medido por um método de balanço de calor. Também Steppe et al. (2010), num estudo comparativo entre os métodos de *Granier*, dos impulsos de calor e da deformação do campo de temperaturas, verificou que aquele primeiro método foi o que mais subestimou (em cerca de 60%) as medições do fluxo de seiva obtidas por gravimetria. Ferreira et al. (2008) relatam estudos conduzidos pelos autores em pomares de pessegueiro, kivi e em vinha em que T_c é fortemente subestimada (em mais de 80%) pelo método de *Granier* relativamente ao método das flutuações instantâneas. Ferreira et al. (2012) em vinha

constatarem igualmente que o método de Granier subestimou fortemente T_c relativamente ao método EC.

A medição da E_s por mini- ou micro-lisímetros consiste na utilização de cilindros de pequenas dimensões (cuja base deve possuir uma rede de malha fina para a drenagem da água gravitacional) que são preenchidos com amostras de solo, de preferência não perturbadas, e colocados em ‘pontos chave’ por forma a captar a heterogeneidade das condições de humidade do solo, por exemplo no interior ou fora da zona humedecida pela rega, e de sombreamento, por exemplo imediatamente abaixo da planta, entre plantas na linha e na entrelinha. Os mini- ou micro-lisímetros são pesados e colocados de novo no seu lugar, sendo a evaporação calculada pela diferença de peso entre pesagens sucessivas, garantida que esteja a ausência de drenagem. Este método é sem dúvida o mais utilizado devido a ser pouco dispendioso e por permitir, devido à sua simplicidade, uma ampla amostragem do solo. Vários estudos que aplicam este método podem ser citados, como o de Stroosnijder (1987), Wythers et al. (1999) e Daamen et al. (2003) em solo sem cobertura vegetal, Todd et al. (1991) e Herbst et al. (1996) em milho, Leuning et al. (1994) em trigo, Liu et al. (2002) e Zhang et al. (2013) para a sequência trigo de inverno-milho, Ham et al. (1990) em algodão, e Bonachela et al. (2001) e Rousseaux et al. (2009) em olival. Uma revisão da utilização desta metodologia para a medição da E_s , nomeadamente em termos de potenciais erros, foi efectuada por Klocke et al. (1990).

A estimação de E_s como a diferença entre ET_c e T_c foi utilizada num grande número de estudos, por exemplo: Ham et al. (1990), em algodão, com E_s dada pela diferença entre a ET obtida pela razão de Bowen e a T_c dada pelo método do balanço de calor no caule; Cammalleri et al. (2013), em olival, com E_s dada pela diferença entre a ET obtida pela razão de Bowen e a T_c dada pelo método de *Granier*; e Er-Raki et al. (2009) e Zhang et al. (2014), respectivamente, em algodão e em olival, com E_s dada pela diferença entre ET calculada pelo método das flutuações instantâneas e T_c pelo método do balanço de calor do caule.

O método dos isótopos estáveis baseia-se na partição da ET em E_s e T_c , calculando cada uma daquelas fracções com base nas diferentes composições isotópicas dos fluxos de vapor de água provenientes do solo e das folhas, consequência do fracionamento dos isótopos da água do solo no primeiro caso e na ausência deste fenómeno no segundo. Exemplos da aplicação deste método são os estudos conduzidos por Ferreti et al. (2003), Williams et al. (2004), Wang et al. (2010), e Sutanto et al. (2012).

Com a utilização de câmaras de fluxos de gases a E_s é calculada em função da taxa de variação temporal da concentração de vapor de água (mmol s^{-1}) medida com um analisador de infravermelhos (Iritz et al., 1997; Steduto et al., 2002; Heijmans et al., 2004; Raz-Yaseef et al., 2010) ou em função da taxa de variação temporal da densidade de vapor ($\text{g m}^{-3} \text{s}^{-1}$) calculada com base em medições de alta frequência das temperaturas de bolbo seco e húmido com um psicrómetro de aspiração forçada (Stannard e Wetz, 2006).

2.3. Modelação/Estimação indirecta da evapotranspiração cultural

Os modelos de simulação das trocas de energia e massa entre os cobertos vegetais e a atmosfera utilizam diferentes concepções para a estrutura do copado, tendo sido esta a característica diferenciadora utilizada para agrupar os vários modelos descritos nas secções 2.3.1 e 2.3.2. No entanto, optou-se por agrupar em secção própria (2.3.3) os modelos que, embora diferindo quanto à conceptualização da estrutura do copado, partilham o recurso à informação obtida por detecção remota para a estimação de alguns dos seus parâmetros.

2.3.1. Modelos de um compartimento

Os modelos de um compartimento consideram que a absorção de toda a radiação líquida e as trocas de calor e vapor entre o coberto vegetal e a atmosfera, se processam ao nível de único plano horizontal (como se de uma grande folha se tratasse, i.e., o pressuposto *big-leaf*, visto mais à frente), situado a uma determinada altura no interior do coberto. De entre este tipo de modelos, destaca-se, por ser possivelmente o método mundialmente mais utilizado para estimar a ET e por ser universalmente aceite pela comunidade científica como uma abordagem teoricamente superior (Shuttleworth, 2006), a equação de Penman-Monteith (Monteith, 1965, 1985). Esta equação deriva da equação de Penman (1948), que combina as equações do balanço de energia e das transferências aerodinâmicas de superfície, à qual Monteith (1965) introduziu o conceito de resistência de superfície (r_s) para a difusão do vapor de água, permitindo generalizar o seu uso a qualquer tipo de superfície e condição hídrica. No método de Penman-Monteith (PM) a estrutura tridimensional do coberto é reduzida a um único plano horizontal, como se de uma ‘grande folha’ se tratasse (o pressuposto *big leaf*), situado a uma determinada altura no interior do coberto, onde se dá a absorção de toda a radiação líquida e as trocas de calor e vapor de água com a atmosfera, cujo controlo é exercido por uma resistência aerodinâmica (r_a) comum, operando entre aquele plano e um nível de referência acima do coberto, em série com uma resistência de superfície (r_s) única, que conjuga as resistências estomática e do solo à difusão do vapor de água, e a resistência

aerodinâmica dentro do copado, desde aquelas superfícies até ao nível da *big leaf* (Alves et al., 1998). A utilização da equação de PM pode ser feita segundo duas abordagens: 1) a directa, ou ‘a um passo’, em que é necessário adoptar modelos de cálculo da r_a e da r_s , e estimar/calibrar os parâmetros dos modelos para o coberto em causa; ou 2) a indirecta, ou ‘a dois passos’, que envolve num primeiro passo a aplicação da equação PM a um coberto vegetal de referência (a relva ou a luzerna) com características bem definidas, em que r_a é dada apenas em função da velocidade do vento (u_z), e com uma r_s usualmente fixa, obtendo-se a designada evapotranspiração de referência (ET_o), representativa da procura climática, e num segundo passo a multiplicação da ET_o por um coeficiente cultural (K_c), representando a integração das características da cultura (ligadas à r_a , r_s e ao albedo) que a distinguem da cultura de referência.

Abordagem ‘a um passo’ da equação de Penman-Monteith

A abordagem a ‘um passo’ da equação PM é utilizada sobretudo para estimação da ET em intervalos de tempo curtos (usualmente 30 minutos ou uma hora), indo ao encontro do pressuposto de que esta equação é estritamente realística apenas quando aplicada durante períodos de tempo em que as condições meteorológicas são constantes (Rana et al., 1994; Shuttleworth, 2006), permitindo além disso levar em consideração a conhecida variação da r_s ao longo do dia em função das variáveis ambientais, nomeadamente a radiação, DPV e temperatura, e o seu impacto sobre a ET (Alves e Pereira, 2000; Katerji e Rana, 2006; Irmak e Mutiibwa, 2009). A questão mais problemática da abordagem ‘a um passo’ reside precisamente na estimação da r_s , uma vez que é difícil combinar num simples modelo todas as suas componentes e respectivas dinâmicas: 1) a resistência estomática (r_l), dependente da morfologia das folhas, da sua idade, do estado hídrico da planta e da resposta estomática específica às condições ambientais; 2) a resistência do solo, dependente das propriedades hidrodinâmicas deste, do grau de sombreamento pela cultura, práticas de gestão do solo e da rega; e 3) resistência aerodinâmica dentro do copado, desde as superfícies citadas anteriormente até ao nível da *big leaf*, que dependem essencialmente do vento e do maior ou menor acoplamento do coberto com a atmosfera.

Apesar disso, têm sido desenvolvidos e utilizados diversos modelos de r_s , ou do seu inverso, a condutância de superfície (g_s), segundo duas abordagens distintas (Li et al., 2009). Na primeira abordagem, designada ‘de baixo para cima’ ou ‘da folha ao coberto’, em que usualmente apenas a componente estomática (g_l) da g_s é considerada, os valores médios de g_l obtidos a partir de medições em folhas representativas das camadas do coberto que se supõem

contribuírem mais para a ET, são relacionados com medições simultâneas de variáveis microclimáticas e fisiológicas, por forma a calibrar os parâmetros do modelo. Um modelo muito utilizado nesta abordagem é o modelo de Jarvis (1976), que considera de forma multiplicativa (não sinérgica) os efeitos individuais de variáveis microclimáticas e fisiológicas sobre g_l , tendo sido utilizado por exemplo por Baldocchi (1991), Rochette (1991), Kim e Verma (1992), Zhang et al. (2008) e Ding (2014). Destacam-se também os modelos de Ball (1987), Leuning (1995) e Dewar (2002), todos descrevendo a resposta de g_l em função de variáveis micrometeorológicas e da taxa de assimilação de CO_2 , os dois últimos introduzindo modificações no primeiro com vista a melhorar o desempenho do modelo, respectivamente, em condições de baixa concentração de CO_2 atmosférico e de stress hídrico. O passo final, estando calibrados os modelos de g_l , é fazer a passagem (*upscaling*) da folha ao coberto, normalmente através multiplicação de g_l pelo LAI efectivo (LAI_{eff}), seguindo o argumento que são as folhas da parte superior do copado que absorvem a maioria da radiação e que estão mais acopladas ao ar exterior mais seco e que portanto contribuem maioritariamente para a transpiração (Alves et al., 1998), podendo utilizar-se a relação simples de Allen et al. (1989, 1994), em que $LAI_{eff} \approx 0.5 LAI_{total}$, ou variando a proporção do LAI_{eff} relativamente a LAI_{total} consoante o valor deste último (Ben-Mehrez et al., 1992). Em modelos mais complexos, tais como os utilizados por Baldocchi (1991), Rochette (1991), Kim e Verma (1992) e Ding (2014), são simulados os processos de transferência radiativa no interior do copado, o que permite repartir a radiação absorvida entre folhas iluminadas e sombreadas e assim estimar uma g_l média distinta para estas duas fracções ($g_{l\text{ illum}}$ e $g_{l\text{ symb}}$), assim como estimar o LAI para estas duas fracções (LAI_{illum} e LAI_{symb}), realizando-se o *upscaling* como a média entre $g_{l\text{ illum}}$ e $g_{l\text{ symb}}$ ponderada por LAI_{illum} e LAI_{symb} .

A segunda abordagem à modelação de r_s , designada ‘de cima para baixo’ (*Top-Down*), envolve a medição das trocas de calor latente entre os cobertos vegetais e a atmosfera com recurso a métodos de estimação directa *in-situ*, a inversão da equação de PM por forma a calcular r_s como termo residual e o relacionamento da r_s assim obtida com variáveis ambientais e fisiológicas. São disto exemplo os estudos de Stewart (1988), Magani et al. (1998), Summer e Jacobs (2005), Whitley et al. (2007) e Raab et al. (2015), que utilizaram o modelo multiplicativo de Jarvis (1976) para a modelação de g_s . Um outro modelo, o de Katerji e Perrier (1983), estima o rácio r_s/r_a (tal como consta na equação de PM) por regressão linear sobre r^*/r_a , em que r^* é a designada ‘resistência crítica’ (Katerji e Perrier, 1983; Rana et al., 1994) ou ‘resistência de superfície para a evaporação de equilíbrio’ (Pereira et al., 1999),

método a que Alves e Pereira (2000) fornecem fundamentação teórica, nomeadamente quanto aos parâmetros a (declive) e b (ordenada na origem) da regressão, que dependem mais da cultura e do seu estado hídrico do que das condições climáticas, aspecto também reforçado por (Rana et al., 1997). Este modelo foi já amplamente utilizado com sucesso para várias culturas, em relva e luzerna (Katerji e Perrier, 1983), trigo (Perrier et al., 1980), arroz (Peterschmitt e Perrier, 1991), relva (Rana et al., 1994; Lecina et al., 2003; Perez et al., 2006), sorgo (Rana et al., 1997a; Rana et al., 2001), soja (Rana et al., 1997a) e citrinos (Rana et al., 2005). O modelo de Todorovic (1999), que calcula o fluxo extra de calor sensível para a atmosfera (H') em função do aumento de temperatura t que um coberto vegetal em condições actuais (folhagem exteriormente seca) experiencia relativamente a um coberto vegetal em condições potenciais (folhagem exteriormente molhada), e depois resolve a equação $H' = \lambda ET_p - \lambda ET_a$, em que ET_p é a ET potencial (Penman, 1948) e ET_a a ET actual (Penman-Monteith, 1965), rearranjando-a sob a forma de uma equação quadrática do tipo $aX^2 + bX + c = 0$, em que $X = r_s/r^*$, e os coeficientes a , b e c são calculados com base em t , r^*/r_a , DPV, Δ e γ ; finalmente a equação é resolvida em ordem a X (apresentando uma única solução) e r_s é calculado como $r_s = X r^*$. Este modelo foi utilizado com sucesso por Perez et al. (2006) produzindo estimativas da ET para a relva consistentes com o modelo de Katerji e Perrier (1993).

Abordagem 'a dois passos' da equação de Penman-Monteith

Como revisto por Pereira et al. (2015) a abordagem 'a dois passos' da equação de PM, tem origem aquando da publicação 'FAO-24' por Doorembos e Pruitt (1977), a primeira recomendação da FAO para métodos de estimação das necessidades hídricas das culturas, em que a abordagem seguida foi a de primeiro definir uma ET potencial (ET_p) ou de referência (ET_o), nomeadamente utilizando a equação até então com a base física mais robusta, i.e., a de Penman (1948), e depois estimar a ET das diferentes culturas (ET_c) através da multiplicação da ET_o por um factor de correcção empírico, i.e., o coeficiente cultural (K_c), calculado como o rácio entre medições *in-situ* da ET_c e a ET_o . A equação de Penman, fruto dos estudos conduzidos entretanto e que verificaram a sua tendência para sobrestimar a ET_o (Alves et al., 1998), viria a ser substituída aquando da subsequente publicação 'FAO-56' (Allen et al., 1998), pela equação de Penman-Monteith aplicada a uma cultura hipotética de referência com uma altura de 12 cm, com uma $r_s = 70 \text{ s m}^{-1}$ e um albedo de 0.23, semelhante a um relvado extenso, de altura uniforme, cobrindo totalmente o solo e em conforto hídrico, atribuindo-se-lhe a designação de equação FAO-Penman-Monteith (FAO-PM). Em FAO-56, os valores de

K_c da anterior publicação foram ajustados para ‘trabalhar’ com a equação FAO-PM e foram publicados novos K_c para mais culturas, passando todos a referirem-se a condições climáticas padrão, i.e., clima sub-húmido, com humidade relativa mínima - $HR_{\min} \approx 45\%$ e velocidade do vento a 2 metros de altura - $u_2 \approx 2 \text{ m s}^{-1}$. Foram propostas equações para ajustar os valores tabelados (padrão) de K_c às condições climáticas dos locais de aplicação em função da HR_{\min} , u_2 e altura da cultura (h), bem como quanto à fracção de cobertura do solo (f_c) ou LAI e à existência de stresses hídricos e osmóticos. Também práticas culturais com influência na ET, como a utilização de *mulches* para reduzir as perdas por evaporação do solo e coberturas vegetais activas na entrelinha de pomares e vinhas, foram contempladas através de recomendações para ajuste dos K_c .

A equação FAO-PM foi desenvolvida sobretudo para o cálculo diário da ET_o utilizando médias diárias de valores horários ou sub-horários das variáveis meteorológicas, embora em FAO-56 constem também as orientações para adaptá-la a cálculos horários. A utilização a dois passos da equação PM, doravante designada por método FAO-PM- K_c , ao contrário da abordagem ‘a um passo’, coaduna-se mais para fornecer estimativas da ET_c que tenham uma utilização prática, por exemplo, para o planeamento e gestão da água ao nível da parcela ou do projecto de rega, em primeiro lugar porque, uma vez já estando definidas a r_s e a r_a da cultura de referência, o cálculo da ET_o apenas requer variáveis meteorológicas facilmente mensuráveis. Depois, o passo de tempo diário, largamente o mais utilizado, é mais compatível com aquelas aplicações devido a uma menor exigência quanto à capacidade de armazenamento, de organização e de processamento dos dados. Por último encontram-se disponíveis valores de K_c para a quase totalidade das culturas agrícolas (por exemplo em Allen et al., 1998 e Allen e Pereira, 2009). No entanto algumas críticas têm sido apontadas a esta abordagem, nomeadamente:

- 1) a equação PM é estritamente realística apenas quando aplicada durante períodos de tempo sub-horários, em que as condições meteorológicas são aproximadamente constantes, sendo teoricamente duvidoso que o cálculo da ET_o através desta equação com médias diárias das variáveis meteorológicas e com uma r_s fixa seja uma aproximação fidedigna da integração dos valores sub-horários da ET_o , sabendo que aquelas variáveis variam significativamente ao longo do dia, induzindo variações na r_s e nos fluxos de ET (Shuttleworth, 2006);
- 2) A utilização dos valores tabelados de K_c para uma dada cultura apresenta algumas limitações quando as variedades utilizadas, as densidades de plantação (sobretudo em

pomares), as condições de gestão das culturas e da rega, e o próprio clima sob os quais vão ser aplicados são diferentes das condições padrão (Katerji e Rana, 2006).

Quanto ao ponto 1), apesar de existirem estudos conduzidos sob diferentes climas, como por exemplo o de Rana et al. (1994) em clima semi-árido e o de Medeiros et al. (2005) em clima húmido, que reportam, respectivamente, uma subestimação de 18% e uma sobrestimação de 13.4% da ET_o diária medida por parte da ET_o calculada com a equação FAO-PM utilizando médias diárias das variáveis meteorológicas, a robustez deste método é inquestionável (Allen et al., 2006), a prová-lo os inúmeros estudos realizados em diferentes climas que reportam desvios abaixo dos 10% (Allen et al., 1989; Allen e Fisher, 1990; Jensen et al., 1990; Steduto et al., 1996; Todorovic, 1999; Ventura et al., 1999; Howell et al., 2000; Odhiambo et al., 2001; Garcia et al., 2004; Berengela e Gavilán, 2005). Acresce ainda que, fruto do aparecimento e rápido desenvolvimento de redes de estações meteorológicas automáticas por todo o mundo, passaram a estar facilmente disponíveis dados meteorológicos horários ou sub-horários, e daí mais estudos relativos ao cálculo horário da ET_o com a equação FAO-PM, ou mais frequentemente, com a equação ASCE-PM (ASCE-EWRI, 2005), uma padronização da primeira destinada ao cálculo da ET_o quer para intervalos de tempo diários ou horários, quer considerando uma cultura mais baixa, a relva, ou uma mais alta, a luzerna, como cultura de referência. A equação ASCE-PM, quando utilizada com um passo de tempo horário e considerando a relva como cultura de referência, utiliza durante o período diurno um valor mais baixo de r_s (50 s m^{-1}) do que o valor adoptado para cálculos diários (70 s m^{-1}), utilizando durante a noite uma $r_s = 200 \text{ s m}^{-1}$, fornecendo deste modo estimativas mais fidedignas da ET_o (Allen et al., 1996; Todorovic, 1999; Ventura et al., 1999; Wright et al., 2000; Steduto et al., 2003), vários estudos demonstrando que a soma diária dos valores horários da ET_o assim obtidos são concordantes com ET_o calculada com um passo de tempo diário (Ventura et al., 1999; Itenfisu et al., 2003; Irmak et al., 2005; ASCE-EWRI, 2005).

Quanto ao ponto 2), Katerji e Rana (2006) referem alguns estudos em que se constatarem diferenças de $\pm 40\%$ entre os valores de K_c obtidos experimentalmente e os valores tabelados em Allen et al. (1998). Em muitos dos estudos referidos é possível encontrar relações de causa-efeito entre o exposto atrás acerca do ajuste dos K_c e aquelas diferenças. Assim, no estudo de Testi et al. (2004), diferenças elevadas quanto à fracção de cobertura entre o jovem olival analisado ($<20\%$) e o hipotético olival intensivo (40-60%) de Allen et al. (1998), determinaram certamente diferenças na transpiração da cultura e logo no K_c , uma vez que sendo a rega por gotejamento e por baixo das copas, a evaporação do solo vai ser diminuta.

Em Amayreh e Al-Abed (2005), em melão, a utilização de *mulches* plásticos na linha de plantas cobrindo 50% do solo e a relativamente baixa f_c da cultura (0.85), certamente contribuíram para a diminuição, respectivamente, da evaporação do solo e da transpiração da cultura quando comparada com a situação padrão, determinando uma redução do K_c (apesar de segundo Allen et al., 1998, o *mulch* plástico induzir um aumento da transpiração). Já Lovelli et al. (2008), pelo contrário, constataram que a utilização de *mulches* plásticos cobrindo 35% do solo induziram um aumento do crescimento vegetativo e na transpiração do melão que ultrapassou largamente a redução da evaporação (ao contrário das recomendações de Allen et al., 1998 para ajuste dos K_c), pelo que os valores experimentais de K_c são mais elevados do que os padrão, embora para o caso do cultivo sem *mulches* tenha havido boa concordância. No estudo de Rana et al. (2005), em citrinos no sul de Itália, os valores de K_c obtidos experimentalmente foram comparados com os valores padrão tabelados em Allen et al. (1998) sem a devida correcção climática destes últimos, a qual no ambiente semi-árido da zona do estudo, induziria certamente um aumento dos K_c tabelados. Adicionalmente os valores observados correspondem a valores de K_c actual e não a K_c potencial o que poderá estar a enviesar os resultados obtidos. Também, de entre as quase duas dezenas de estudos citados por Pereira et al. (2015a) envolvendo a determinação da ET_c em culturas agrícolas herbáceas, existem casos (Tolk e Howell, 2001; López-Urrea et al., 2009) em que se verificaram desvios significativos entre a ET_c ou os K_c determinados experimentalmente e os valores padrão de K_c tabelados em Allen et al. (1998) e a respectiva ET_c calculada pelo método FAO-PM- K_c , apesar de nos restantes estudos aquelas estimativas sejam confirmadas experimentalmente e portanto se possa concluir que a metodologia é em geral válida e amplamente aceite.

2.3.2. Modelos de múltiplos compartimentos

Os modelos de múltiplos compartimentos fazem uma repartição da absorção da radiação líquida entre a cultura e o solo, calculando separadamente os fluxos de calor e vapor provenientes da cultura e do solo (e do solo sombreado e solo descoberto no caso dos de três compartimentos). Apesar dos modelos de um compartimento apresentarem em geral uma boa capacidade para simular as trocas de calor e vapor entre os cobertos vegetais e a atmosfera, como referido atrás, existem casos que beneficiam claramente da consideração diferenciada das localizações dos sumidouros para a radiação e das fontes de calor e vapor. De facto, tanto a aplicação directa ('a um passo') da equação PM não faz uma distinção clara entre as plantas e o solo, a prová-lo o facto da maioria dos modelos de r_s mencionados atrás não considerarem

a resistência do solo, como o K_c da aplicação 'a dois passos' o fazer de forma grosseira, i.e., considera apenas a média da evaporação e da transpiração durante os estádios de desenvolvimento das culturas. Assim, por exemplo, no caso de cobertos incompletos/descontínuos, nomeadamente pomares e vinha, ou durante os estádios mais precoces de culturas de cobertura total do solo, em que existe uma fracção importante do solo que está exposto, é importante considerar a repartição da radiação líquida entre planta e solo, uma vez que esta vai originar fluxos de calor e vapor a partir de origens situadas em diferentes planos horizontais e verticais, sob o controlo de diferentes resistências aerodinâmicas e de superfície. Para além disso permite considerar a interação dos fluxos provenientes daquelas origens, por exemplo, o aumento da transpiração das plantas devido à microadvecção de calor sensível proveniente do solo, especialmente quando seco.

Faz-se aqui uma distinção entre dois tipos de modelos de múltiplos compartimentos: modelos semi-empíricos e modelos mecanísticos.

Modelos de múltiplos compartimentos mecanísticos

Nos modelos mecanísticos destaca-se em primeiro lugar o modelo de 'dupla fonte' de Shuttleworth e Wallace (1985), que adapta a equação de PM a dois planos horizontais onde ocorrem as trocas de calor e vapor, um superior, localizado ao nível da *big-leaf*, correspondendo à cultura, e outro inferior, correspondendo à superfície do solo, fazendo uma repartição da R_n entre aqueles dois planos, que origina diferentes fluxos de H e λE , controlados ao nível da cultura por uma resistência estomática (r_l) e uma r_a da camada limite das folhas, e ao nível do solo por uma resistência 'interna' do solo e uma r_a entre a superfície do solo e o nível da *big-leaf*, todas interagindo e influenciando a partição entre T_c e E_s .

O modelo de tripla fonte de Brenner e Incoll (1997) designado por *clumped model*, utilizado por exemplo, por Poblete-Echeverría e Ortega-Farias (2009) em vinha e Liu et al. (2015) em pomar de macieira, que consiste numa extensão do modelo SW por forma a contemplar a distinção entre solo sombreado e solo descoberto, introduzindo mais resistências de superfície e aerodinâmicas e fazendo a repartição com base na f_c .

O modelo SWEAT (Daamen e Simmonds, 1994; Daamen, 1997) e o modelo de Cammalleri et al. (2010) de simulação dos fluxos de água e calor no solo acoplados e interagindo com um módulo de cálculo das transferências de calor latente e sensível entre a cultura e o solo, e a atmosfera.

Modelos de múltiplos compartimentos semi-empíricos

Nos modelos semi-empíricos começa-se por destacar o estudo pioneiro de Ritchie (1972), em que T_c é calculada multiplicando a evaporação potencial (ET_p), calculada pela equação de Penman (1943) com a ‘função do vento’ adaptada a uma superfície cultivada, por uma função raiz quadrada do LAI, e em que E_s é dada como uma função da radiação líquida total (R_n) reduzida por uma função exponencial negativa do LAI numa primeira fase (fase 1) do processo de dissecação da camada superficial do solo (Ritchie, 1972), sendo depois numa segunda fase (fase 2) calculada em função da raiz quadrada do tempo (dias) decorrido desde o final da fase 1.

O estudo de Tanner e Jury (1976), em que T_c e E_s são calculados recorrendo à equação de Priestley-Taylor, com $T_c = \alpha_c(1 - \tau)\lambda E_{eq}$ e $E_s = \alpha_s\tau\lambda E_{eq}$, em que E_{eq} é a evaporação de equilíbrio (Pereira et al., 1999), τ é o factor de transmissividade do copado (função exponencial do LAI), e α_c e α_s calculados em função de τ e τ_0 , este último correspondente a um limiar da transmissividade abaixo da qual E_s é considerada nula (durante a fase 2 do processo de dissecação do solo E_s é calculado como em Ritchie, 1972).

Gallardo et al. (1996), em alface, em que T_c é obtida como $f_{rc} ET_c$, em que f_{rc} é a fracção da radiação interceptada pela cultura (calculada por uma função quadrática da percentagem de cobertura do solo) e ET_c a ET potencial da cultura ($= K_c ET_o$), e E_s é obtida como $(1-f_{rc}) ET_c$ na fase 1 do processo de dissecação do solo e de acordo com o modelo de Boesten e Stroosnijder (1986) na fase 2.

O modelo de Orgaz et al. (2006) que utiliza a aproximação K_c-ET_o , em que o K_c é repartido nas componentes transpiração da cultura, evaporação da água interceptada pelo copado, evaporação do solo humedecido pela chuva e evaporação do solo humedecido pelos gotejadores.

A metodologia dos K_c duais, uma aproximação alternativa ao uso dos K_c médios para o cálculo da ET_c , introduzida aquando da publicação FAO-56 (Allen et al., 1998), é aquela adoptada neste estudo, constituindo o módulo de cálculo da ET_c do modelo de balanço hídrico do solo e de calendarização da rega SIMDualKc (Rosa et al., 2012a, b). Na aproximação dual ao uso dos K_c , este é dividido em duas componentes, cujo cálculo é feito separadamente (Allen et al., 1998, 2005a): o coeficiente cultural basal (K_{cb}), que descreve a transpiração da cultura (T_c), e o coeficiente de evaporação do solo (K_e), que descreve a evaporação da água a partir da superfície humedecida do solo (E_s), este último levando em consideração as

restrições energéticas e hídricas à evaporação. Esta aproximação é particularmente vantajosa em situações em que a evaporação do solo constitui uma fracção importante da ET_c . Também permite estimar melhor os impactos de factores como a frequência da rega e da precipitação, do método de rega (humedecimento total ou parcial da superfície do solo) e da utilização de coberturas do solo - *mulches* (para controlo da evaporação) no consumo total de água pelas culturas. Por outro lado o cálculo separado da componente transpirativa (K_{cb}), permite que aspectos relacionados apenas com T_c , como seja o stress hídrico (causado por baixos valores do potencial matricial e/ou osmótico) sejam mais correctamente contabilizados. Assim, beneficiam da aproximação dual, a simulação de práticas de rega deficitária, em que stresses hídricos moderados são deliberadamente impostos tendo em vista critérios de qualidade ou de produtividade económica da água, ou a utilização de águas de rega salinas, em que o stress salino é controlado por intermédio de aplicações extra de água de rega destinadas à lavagem parcial dos sais que se vão acumulando no solo entre regas sucessivas. O cálculo separado do K_{cb} também permite que este seja estimado a partir de métodos que visam principalmente a componente transpirativa, como sejam a utilização da fracção de cobertura e da altura da cultura (Allen e Pereira, 2009) e índices de vegetação (IV) obtidos por detecção remota.

A metodologia dos K_c duais tem vindo a ser aplicada com sucesso na estimação da ET_c e na sua partição entre T_c e E_s desde a sua publicação em Allen et al. (1998). Exemplos disso são: o estudo de Liu e Pereira (2000) em que provou a sua superioridade relativamente aos K_c simples ou médios em captar os impactos da frequência dos humedecimentos no consumo total de água pela cultura; Allen et al. (2000), em feijão, beterraba sacarina e milho doce, no Idaho, EUA, com $RMSE \approx 0.7 \text{ mm dia}^{-1}$ e rácios entre a ET_c total estimada e medida por lisímetros próximos da unidade; Tolk e Howell (2001), em sorgo para grão, com as estimativas da ET_c pela aproximação dual diferindo em média 6% da ET_c medida com lisímetros de pesagem contra desvios de 15% dos K_c médios; Howell et al. (2004) em algodão, com uma boa concordância entre a ET_c estimada e a medida num lisímetro de pesagem para condições óptimas de rega, embora com pior desempenho para os casos de rega deficitária e em sequeiro; Zhao e Nan (2007), que encontraram uma boa concordância entre os valores do teor de água no solo (SWC) simulado e medido utilizando valores de K_{cb} tabelados em Allen et al. (1998) depois de ajustados às condições climáticas locais; Bodner et al. (2007) para várias coberturas vegetais activas, com desvios de 1.4% e 6.4% entre a ET_c estimada e a medida *in-situ* através do balanço hídrico do solo, respectivamente, num ano húmido e num ano seco; Shahrokhnia e Sepaskhah (2013), em trigo e milho no Irão, constataram que a ET_c

total calculada com os K_c duais diferia, respectivamente, para o trigo e para o milho, apenas +4.8% e -0.3% da ET_c medida, enquanto aquelas diferenças eram de -9.5% e -10.6% com o uso dos K_c médios, embora surpreendentemente tenham verificado uma maior correlação entre os valores diários de ET_c estimados e medidos quando calculados com os K_c simples; Poblete-Echeverría e Ortega-Farias (2013), em vinha, no Chile, demonstraram a importância da calibração local dos K_{cb} e K_c tabelados em Allen et al. (1998) para a obtenção de estimativas da ET_c concordantes com a ET_c medida pelo método das flutuações instantâneas; Er-Raki et al., 2010, em olival, em Marrocos, também constatando a importância da calibração local dos K_{cb} para a obtenção de uma boa concordância entre as estimativas da ET_c , T_c e E_s e as medições (com o método das flutuações instantâneas, fluxo de seiva e diferença entre os dois), respectivamente, com $RMSE = 0.63, 0.59$ e 0.73 mm dia^{-1} ; Er-Raki et al. (2009) em citrinos (laranja) regados gota-a-gota e por alagamento, em Marrocos, com o desempenho de ambas as aproximações K_c médio e K_c dual a melhorarem significativamente com a calibração dos valores de K_c e K_{cb} , no caso dos K_c médios com $RMSE$ de 1.15 e 0.82 mm/dia, respectivamente, para rega localizada e por alagamento, e no caso dos K_c duais com $RMSE$ de 0.97 e 1.26 mm/dia. Greenwood et al. (2009) para várias forragens na Austrália, em que com valores de K_{cb} próximos dos de Allen et al. (1998) a aproximação dual produziu estimativas da depleção da água do solo concordantes com as observações ($0.75 < R^2 < 0.85$, $RMSE < 8 \text{ mm/dia}$). Ding et al. (2013), que efectuaram algumas modificações da metodologia original proposta por Allen et al. (1998) para a simulação da ET_c , T_c e E_s em milho cultivado sobre *mulch* de plástico e regado por sulcos, tendo encontrado uma boa correlação entre as estimativas e os valores medidos de ET_c , T_c e E_s , respectivamente, em lisímetros de pesagem, pelo método do fluxo de seiva e em microlisímetros; Zhao e Zhao (2014), na província de Gansu, na China, estimaram a T_c do milho para semente como $T_c = K_{cb} ET_o$, tendo obtido resultados coerentes com a T_c medida através de um método de medição do fluxo, embora apenas depois da calibração local dos valores de K_{cb} ; Zhao et al. (2015), no noroeste da China, em vinha regada por sulcos, constatarem um bom desempenho da metodologia dos K_c duais em prever a ET_c , T_c e E_s medidas, respectivamente, com o método das flutuações instantâneas, fluxo de seiva e microlisímetros.

2.3.3. Modelos de estimação da evapotranspiração com base em informação obtida por detecção remota

A detecção remota permite obter informação sobre as propriedades físicas e características dos cobertos vegetais a partir de medições da radiação electromagnética (em uma ou mais regiões do espectro electromagnético) reflectida ou emitida pelos mesmos. A radiancia na região visível e do infravermelho próximo (NIR) reflectida pelo coberto e detectada por sensores remotos é utilizada para o cálculo de índices de vegetação (IV), do índice de área foliar (LAI), fracção de cobertura do solo (f_c) e do albedo de superfície (α_s). Já a radiancia na região do infravermelho térmico emitida pelo coberto é convertida na temperatura radiométrica de superfície ($T_{s\ rad}$). Estas variáveis podem então ser utilizadas por modelos para estimar a ET_c , fazendo-se aqui a distinção entre dois tipos: *i*) modelos empíricos baseados em índices de vegetação; e *ii*) modelos de base física baseados no balanço de energia. Estes modelos são geralmente optimizados para operar com informação de DR com uma determinada resolução espacial, desde a obtida com os sensores posicionados no interior/ao nível do coberto ou numa perspectiva aérea mas ainda próxima do topo do coberto (em ‘torres’ edificadas para o efeito ou a bordo de veículos aéreos não tripulados – *drones*), instalados em aeronaves tripuladas em rotas suborbitais ou em satélites em órbita terrestre.

Modelos baseados em índices de vegetação

Os índices de vegetação (IV) mais utilizados neste tipo de modelos são calculados através de equações que combinam as reflectâncias das bandas do vermelho (VR) e do infravermelho próximo (NIR), que são aquelas melhor permitem detectar a presença, densidade e condição da vegetação (ou a ausência dela). Embora possam variar entre -1.0 e 1.0 se forem consideradas as superfícies aquáticas, a gama de valores assumidos em superfícies terrestres é de 0-1, respectivamente, para condições de solo nú e de cobertura total do solo pela vegetação. Dado que existe um óbvio relacionamento entre os IV e o LAI ou a f_c , e entre estas duas variáveis e o K_c/K_{cb} , podem então ser derivadas equações empíricas que estimem o K_c/K_{cb} em função dos IV. Sendo assim, os modelos baseados nos IV são na sua essência modelos do tipo $K_c ET_o$ ou $(K_{cb} + K_e) ET_o$, já descritos nas secções 2.3.1 e 2.3.2.

Calera Belmonte et al. (2005) ajustaram modelos lineares à relação entre o K_c ou o K_{cb} e o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) a partir de imagens multiespectrais dos satélites Landsat 5, Landsat 7 e IRS (*Indian Remote Sensing Satellite*) e de valores experimentais de K_c e K_{cb} obtidos para várias culturas herbáceas na área piloto de Barrax em

Espanha, no âmbito do projecto DEMETER. Também a partir de resultados obtidos neste projecto, Cuesta García et al. (2004) e D'Úrso e Calera Belmonte (2006) complementaram a relação K_{cb} -NDVI obtida por Calera Belmonte et al. (2005) com uma relação linear f_c -NDVI, que permite o posterior cálculo de K_e em função de f_c e finalmente o cálculo de K_c como $K_{cb} + K_e$. Os mesmos D'Úrso e Calera Belmonte (2006) desenvolveram também uma abordagem mais analítica para o cálculo do K_c , envolvendo os seguintes passos: *i*) cálculo do LAI e do albedo de superfície (α_s) através do processamento das imagens multiespectrais; *ii*) utilização dos valores de LAI e α_s assim obtidos na equação de Penman-Monteith para cálculo da ET_c ; *iii*) cálculo do K_c como ET_c/ET_o ; e *iv*) regressão polinomial múltipla entre os valores de K_c , LAI e α_s para obter um modelo de cálculo do K_c . Garatuza-Payan e Watts (2003) derivaram uma relação exponencial negativa entre o K_c e o NDVI/SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*), para culturas herbáceas (milho, trigo, algodão e hortícolas) no vale de Yaqui, no noroeste do México. González-Dugo et al. (2009), no Iowa, EUA, num estudo comparativo de várias aproximações de cálculo da ET com recurso a dados obtidos por imagens de satélite, propõem o cálculo do K_{cb} em função de um K_{cb} máximo e do rácio entre $f_c/f_{c\ max}$, onde f_c é calculada como uma função linear do SAVI e $f_{c\ max}$ é a f_c para o qual o K_{cb} é máximo. Campos et al. (2010), obtiveram numa vinha situada em Albacete, Espanha, uma relação linear entre o K_{cb} , e o NDVI e o SAVI, conjugando depois depois o K_{cb} com o K_e de acordo com a metodologia dos K_c duais para calcular a ET_c .

Apesar de nos estudos acima mencionados os modelos baseados em IV tenham produzido em geral estimativas da ET_a concordantes com a ET_a medida (pelos métodos lisimétrico, Razão de Bowen e Flutuações Instantâneas), também revelam algumas deficiências. Assim, Calera Belmonte et al. (2005) encontrou uma subestimação da ET_a medida para as culturas da cebola e do alho, o que sugere que para culturas com cobertura parcial do solo a simples relação K_c -NDVI não contabiliza correctamente a evaporação do solo. Por outro lado González-Dugo et al. (2009) verificaram uma sobrestimação da ET_a derivada dos IV (ET_a -IV) num período de carência hídrica na cultura do milho, afirmando que a modelação ET_a -IV só é sensível a stresses hídricos quando estes determinam uma redução da biomassa ou uma alteração na geometria do copado. Esta afirmação é corroborada por Conceição et al. (2011) que constatarem que a redução da ET_c numa vinha com rega deficitária não é detectada pelos modelos ET-IV.

Modelos baseados no balanço de energia

Nos modelos baseados no balanço de energia, o fluxo de calor latente $-\lambda_w E$ (i.e., a $ET_{c\ act}$ em termos energéticos) é calculado como termo residual da equação do balanço de energia, utilizando informação sobre as reflectâncias espectrais, o LAI, f_c e $T_{s\ rad}$ obtidos por DR para o cálculo de um ou mais dos restantes termos. Estes modelos, mecanísticos e essencialmente de base física, podem diferir quanto à conceptualização da estrutura do copado, podendo ser feita uma distinção entre modelos de um compartimento ou de múltiplos compartimentos.

Exemplos de modelos mono-compartimento são o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*, Bastiaansen et al., 1998) e o METRICTM (*Mapping Evapotranspiration at High Resolution using Internalised Calibration*, Allen et al., 2007a), baseado no primeiro, cuja característica mais inovadora é o procedimento de cálculo do fluxo de calor sensível (H). Em ambos os modelos, H é calculado recorrendo ao diferencial de temperatura (dT) entre o coberto e a atmosfera. Para o cálculo de dT , é primeiramente estabelecida para cada imagem de satélite uma relação linear entre dT e a $T_{s\ rad}$ conjunta do copado e do solo ($T_{s\ rad\ conj}$), utilizando pares de valores dT - $T_{s\ rad\ conj}$ obtidos em duas situações extremas e opostas: solo nú (o designado *hot pixel*) e vegetação densa e plenamente abastecida de água (*cold pixel*). Depois, dT é calculado em cada pixel utilizando os valores de $T_{s\ rad\ conj}$ nesses pixéis na função dT - $T_{s\ rad\ conj}$ previamente estabelecida. O modelo METRIC difere do modelo SEBAL no que toca ao cálculo de dT para as condições de *hot pixel* e *cold pixel*. Assim, para o *hot pixel*, enquanto o SEBAL assume $\lambda_w E = 0$, o METRIC recorre ao balanço hídrico da camada superficial evaporativa do solo para contabilizar o fluxos de $\lambda_w E$ decorrentes da evaporação do solo. Quanto ao *cold pixel*, enquanto que o SEBAL assume $H = 0$, o METRIC calcula-o como $H = R_n - G - \lambda_w E$ em que $\lambda_w E = 1.05 \lambda_w ET_o$. Outra das diferenças entre os modelos reside na extrapolação da $ET_{c\ act}$ instantânea (à hora da passagem do satélite) ($ET_{c\ act\ inst}$) para o período de 24 horas. Para isso, o SEBAL utiliza o conceito de ‘fracção de evaporação’ (Δ), começando por calcular o valor instantâneo desta variável (Δ_{inst}), i.e., o quociente entre $\lambda_w E$ e $R_n - G$ à hora de passagem do satélite, admitindo depois que Δ_{inst} é constante durante o dia para finalmente calcular a $ET_{c\ act}$ diária como $ET_{c\ act\ 24h} = \Delta_{inst} R_{n\ 24h}$, em que $R_{n\ 24h}$ é a radiação líquida à superfície para um período de 24 horas. Já o METRIC recorre a um K_c instantâneo (à hora da passagem do satélite) ($K_{c\ inst}$), calculado como o quociente entre a $ET_{c\ act\ inst}$ e a ET_o à hora da passagem do satélite (calculada com dados de estações meteorológicas afectas à área de estudo e usando a luzerna como cultura de referência); depois, partindo do

pressuposto que $K_{c\ inst}$ é invariável ao longo do dia, a $ET_{c\ act}$ diária é calculado como: $ET_{c\ act\ 24h} = K_{c\ inst} ET_{o\ 24h}$, onde $ET_{o\ 24h}$ é a ET_o para períodos de 24 horas.

As outras variáveis de ambos os modelos que utilizam as grandezas físicas e características dos cobertos obtidos por DR são: *i*) albedo da superfície (α_s), estimado a partir da integração das reflectâncias na região de curto comprimento de onda do espectro (0.2 - 3.2 μm); *ii*) radiação de longo comprimento de onda emitida pela superfície ($R_{L\ up}$), calculada em função da $T_{s\ rad\ conj}$; e *iii*) fluxo de calor de ou para o solo (G), calculada em função da $T_{s\ rad\ conj}$ e do NDVI.

Nos modelos de dois compartimentos destacam-se os modelos da família TSEB (*Two-Source Energy Balance Model*), desenvolvidos a partir do trabalho pioneiro de Norman et al. (1995). Estes modelos assentam na estimação das temperaturas radiométricas do copado ($T_{rad\ veg}$) e do solo ($T_{rad\ soil}$) por partição $T_{s\ rad\ conj}$ medida (Norman et al., 1995; Kustas e Norman, 1997; 1999), ou na sua medição directa (Sánchez et al., 2008), para cálculo dos gradientes de temperatura entre aquelas superfícies e o ar acima do coberto e, conseqüentemente, dos fluxos de H a partir do copado (H_c) e do solo (H_s). Em qualquer dos casos é indispensável uma correcção de $T_{s\ rad\ conj}$, ou de $T_{rad\ veg}$ e de $T_{rad\ soil}$, por forma a descontar do sinal térmico medido a fracção deste que não é emitida mas sim reflectida (Norman et al., 1995). Adicionalmente, e sempre que a distância entre os sensores térmicos e o coberto o justificar, poderão ter de ser utilizados algoritmos para descontar a radiação térmica emitida pela própria atmosfera e para contabilizar a absorção atmosférica da radiação emitida pelas superfícies (Sanchez et al., 2008). Estes procedimentos são essenciais para aproximar $T_{rad\ veg}$ e $T_{rad\ soil}$ das verdadeiras temperaturas aerodinâmicas do coberto e do solo.

Uma vez que os fluxos de λE provenientes do copado ($\lambda_w E_c$) e do solo ($\lambda_w E_s$) são calculados como os termos residuais dos balanços de energia naquelas superfícies, é necessário modelar para além de H_c e H_s , a partição de R_n entre o copado (R_{nc}) e o solo (R_{ns}), o que pode feito desde uma simples função exponencial do LAI, como em Norman et al. (1995), até complexos algoritmos de base física para as trocas radiativas nos cobertos vegetais (Kustas e Norman, 1999). Quanto a G , é normalmente estimado como uma fracção C_G de R_{ns} , podendo C_G assumir um valor constante ao longo do dia, ser uma função do ângulo zenital ou da diferença entre a hora da medição e a hora do meio dia solar (Kustas e Norman, 1999).

2.4. Modelação do balanço hídrico do solo

A simulação das dinâmicas da água do solo com recurso a aplicações/modelos informáticos pode ser realizada essencialmente através de duas abordagens: pela simulação dos fluxos de água do solo ou pelo cálculo directo do balanço hídrico do solo, geralmente utilizando um passo de tempo diário. A primeira abordagem é usualmente adoptada em modelos mecanísticos, geralmente orientados para a simulação do desenvolvimento das culturas e da produção em função da disponibilidade de energia, práticas de gestão da rega e da fertilização, salinidade do solo ou da água de rega, etc. Neste tipo de modelos, os fluxos de água no solo são geralmente calculados através da resolução numérica da equação de *Richards*, em que a extracção radicular é calculada em função da T_c potencial (obtida por um método de partição da ET_c entre T_c e E_s), da distribuição da densidade radicular com a profundidade e de funções de stresse hídrico e osmótico, e a E_s calculada em função de uma E_s potencial, do gradiente de pressão da água entre a camada superficial do solo e a atmosfera e da condutividade hidráulica não saturada desta camada (embora vários modelos ofereçam a possibilidade de poder escolher abordagens mais empíricas para o cálculo da E_s). A maioria destes modelos contemplam os fluxos de ascensão capilar (CR) para a zona radicular a partir de uma toalha freática, determinados pela profundidade daquela, pela condutividade hidráulica não saturada do solo e pelo gradiente de potencial matricial estabelecido no solo em resultado da extracção radicular e da E_s . Estes tipo de modelos são altamente exigentes em dados, particularmente em relação às propriedades hidráulicas do solo e aos dados das culturas e nutrientes, e requerem um investimento substancial em termos de parametrização e calibração. Do exposto acima conclui-se que, embora possam ser utilizados para apoiar a programação da rega, são demasiado complexos para terem uma ampla aplicação prática quanto àquele aspecto. Exemplos deste tipo de modelos incluem os modelos SWEAT (Daamen e Simmonds, 1994; Daaman, 1997), CropSyst (Stöckle et al., 2003), RSWQM (Alves e Cameira, 2002), EPIC (Guerra et al., 2005), HYDRUS (Mermoud et al., 2005, Simunek et al., 2008), SWAP (Vazifedoust et al., 2008), SWAT (Luo et al., 2008) e AquaCrop (Raes et al., 2009).

Contrariamente aos modelos mecanísticos, os modelos baseados no balanço hídrico do solo são geralmente mais diretamente projetados para a simulação da programação de rega, sendo normalmente de natureza mais empírica (Pereira et al., 1992; 1995). Neste tipo de modelos o solo é geralmente aproximado por um reservatório com uma determinada capacidade de armazenamento, que recebe a água da precipitação e da rega, armazena-a para uso da cultura e drena-la para fora da zona radicular se a sua capacidade de armazenamento for ultrapassada,

podendo também receber água por ascensão capilar a partir de uma toalha freática. Este tipo de modelos empregam normalmente procedimentos mais simples do que os modelos anteriores para estimar a ET_c , podendo fazer ou não a sua partição entre T_c e E_s , e prevendo a redução desta devido a stresses matriciais, osmóticos ou a condições de saturação promotoras de anaerobiose. No entanto, poucos são os que contemplam a ascensão capilar (CR) a partir de uma toalha freática, os que o fazem, utilizando abordagens empíricas de diferentes complexidades, como sejam: 1) o procedimento proposto por Doorenbos e Pruitt (1977), adoptado no modelo ISAREG (Teixeira e Pereira, 2002; Liu et al., 1998), em que CR é calculada em função da CR potencial (CR_{pot}), dada em função do tipo de solo, e da razão entre a água disponível no solo (ASW) e a água facilmente disponível (RAW); 2) uma melhoria da equação anterior, acrescentando-lhe a profundidade da toalha freática (D_{WT}) e os coeficientes de ajustamento da função exponencial adoptada para a condutividade hidráulica não saturada do solo (Sepaskhah et al., 2002); 3) a equação proposta por Jensen (1972), onde CR é calculada em função da ASW na zona radicular, da D_{WT} , da altura da ‘franja’ capilar acima da toalha freática, da profundidade radicular e da ET_c ; 4) a metodologia adoptada no modelo BASINMAN (Wu et al., 1999), onde a CR é calculada em função da distância entre o primeiro terço da zona radicular e a D_{WT} , de um valor limite da D_{WT} abaixo do qual a CR é residual (função do tipo de solo), do teor de humidade do solo na zona radicular e de coeficientes de ajustamento da função a dados experimentais; 5) modelos em que a CR é dada por funções exponenciais, potência e lineares da D_{WT} , com os coeficientes dos modelos dependendo das propriedades hidráulicas e/ou texturais dos solos, não considerando a influência da ASW (Ragab e Amer; 1986; Grismer e Gates, 1988; Li e Dong, 1998); e 6) as equações paramétricas de Liu et al. (2006), que definem: um nível crítico superior para a D_{WT} (D_{WC}), acima da qual a CR potencial (CR_{pot}) não cresce mais; valores diferenciados da CR_{pot} consoante D_{WT} seja maior ou menor do que D_{WC} ; e calculam a CR actual em função do seu ‘posicionamento’ relativamente a um limiar superior e a um limiar inferior da ASW (calculados em função da D_{WT}), respectivamente, acima do qual $CR = 0$ e $CR = CR_{pot}$, e entre os quais CR aumenta com o decréscimo da ASW.

Estes modelos requerem menos dados do solo, a parametrização da cultura é mais fácil e podem empregar procedimentos mais simples para estimar ET_c . Os impactos sobre a produção devido a stresses hídricos ou osmóticos são geralmente considerados através de meios empíricos, como os modelos simples e fásico Stewart (Stewart et al., 1977; Doorenbos e Kassam, 1979), ou o modelo fásico de Jensen (1986). A precisão deste tipo de modelos para

efeitos de programação da rega é elevada quando os dados meteorológicos e de solo são de boa qualidade, e sempre que sejam capazes de relacionar stresses hídricos ou salinos com quebras de produção. Exemplos são os modelos ISAREG (Teixeira e Pereira, 1992, Liu et al., 1998), ISM (George et al., 2000), BUDGET (Raes et al., 2006), OSIRI (Chopart et al., 2007) e PILOTE (Khaledian et al., 2009).

2.5.. Modelação da evapotranspiração em cobertos lenhosos descontínuos

Os cobertos vegetais lenhosos agrícolas, caso das árvores de fruto e da vinha, apresentam características estruturais e fisiológicas que os fazem diferir significativamente da maioria das culturas herbáceas agrícolas relativamente ao consumo de água, i.e., à evapotranspiração cultural (ET_c). Assim, fruto da sua elevada estatura e frequente cobertura incompleta ou descontínua do solo estão intimamente ligados ou acoplados ao ar circundante, apresentando uma resistência aerodinâmica mais baixa e um controlo estomático maior do que a as espécies herbáceas (Paço, 2003). A cobertura parcial do solo também origina zonas diferenciadas relativamente à absorção da radiação e às trocas de calor sensível e latente com a camada limite atmosférica: o coberto vegetal, o solo sombreado debaixo deste e o solo exposto à radiação solar nas zonas não cobertas. Além disso, existe uma interacção entre os fluxos daquelas diferentes proveniências. Assim, por exemplo, a microadvecção de calor sensível do solo nas entrelinhas, especialmente quando seco, para as copas das árvores pode aumentar a transpiração (Allen e Pereira, 2009) ou contrariamente induzir o encerramento dos estomas (Paço et al., 2003). A condução em linhas, muitas vezes utilizada neste tipo de cobertos, origina variações microclimáticas em ambos os planos horizontal e vertical com impacto na ET_c , nomeadamente a quantidade de radiação interceptada, as temperaturas de superfície e o regime de turbulência de um lado e do outro da linha (Paço, 2003).

Do exposto acima pode depreender-se as dificuldades que se apresentam à modelação da ET_c neste tipo de cobertos. Não obstante vários tipos de modelos, desde complexos modelos mecanísticos a modelos de natureza mais empírica têm sido utilizados para esse efeito. Começando pela abordagem mecanística ao problema, referem-se os estudos de Ortega-Farías e López-Olivari (2012) no Chile, em olival, e de Zhao et al. (2015) na China, em vinha, que utilizaram o modelo de dupla fonte de Shuttleworth e Wallace (1985), obtendo os primeiros autores estimativas de ET_c apresentando uma boa aderência com a ET_c obtida pelo método das flutuações instantâneas (apenas com uma ligeira sobrestimação de 2 a 6%) e os segundos estimativas de ET_c concordantes com as do método EC, de T_c concordantes com as obtidas através de medições do fluxo de seiva (com uma ligeira sobrestimação) e de E_s com a obtida

em microlisímetros (subestimação). Li et al. (2010) utilizaram uma simplificação do modelo SW, consistindo basicamente na substituição da equação de cálculo da E_s daquele modelo pela equação de *Priestley-Taylor*, obtendo boas correlações entre a T_c simulada com a medida pelo método de fluxo de seiva, com E_s bem correlacionada com a medida em microlisímetros e com ET_c simulada concordante com a medida como a soma T_c e E_s pelos métodos acima referidos. Poblete-Echeverría e Ortega-Farias (2009) no Chile, em vinha, e Liu et al. (2015), na China em pomar de macieiras, utilizaram, respectivamente, o modelo de tripla fonte de Brenner e Incoll (1997) e uma modificação deste para aplicação à escala horária destinada a melhorar a estimativa de E_s , obtendo os primeiros resultados ao nível da ET_c com boa associação aos obtidos com o método EC, e os segundos uma boa correlação dos valores simulados de T_c e E_s com os medidos com o fluxo de seiva e microlisímetros e ET_c simulada com a ET_c dada pelo método do balanço hídrico e como T_c (fluxo de seiva) + E_s (microlisímetros). Camalleri et al. (2010), na Sicília, em olival, acoplou o modelo de Noilhan e Panton (1989) para a simulação do balanço hídrico do solo com um módulo de cálculo da T_c e E_s em que estas são obtidas pela resolução da equação do balanço de energia, obtendo bons resultados ao nível da ET_c horária, diária e sazonal quando comparados com as estimações pelo método da cintilometria, e do teor de água no solo quando comparados com os obtidos por TDR.

Quanto à utilização de modelos de natureza empírica, semi-empírica ou de base física simplificada, refere-se o estudo de Testi et al. (2006), em Espanha, em olival, que desenvolveram um modelo de cálculo diário da T_c e da E_s , em que a primeira é calculada com a equação PM, depois de parametrizado um modelo de condutância estomática, e em que E_s é calculada separadamente para as fracções humedecidas e não humedecidas pela rega com o modelo de Bonachela et al. (1999; 2001), tendo os resultados a nível da ET_c revelado uma boa concordância com as estimativas da ET_c pelo método EC. O modelo de Orgaz et al. (2006) para aplicação em olival, que utiliza a aproximação K_c-ET_o , em que o K_c é repartido nas componentes T_c , evaporação da água interceptada pelo copado, E_s da fracção humedecido pela chuva e E_s da fracção humedecida pelos gotejadores, todas elas obtidas através do ajustamento de equações empíricas aos K_c simulados para diversos cenários com o modelo diário de Testi et al. (2006). O estudo de Yunusa et al. (1997), na Austrália, em vinha com cobertura vegetal activa (CVA) na entrelinha, propondo o cálculo da T_c como função empírica do LAI, da f_{PAR} e da r_s e estimando a transpiração da CVA (T_{CVA}) em função do teor de água do solo e E_s dado como $ET-T_c-T_{CVA}$, (com ET calculada pelo balanço hídrico do solo),

obtendo boas correlações com o método *heat pulse* (fluxo de seiva) nos dois primeiros modelos e uma boa concordância entre as estimativas da T_{CVA} tal como referido atrás com aquelas calculadas com o método FAO-PM. O estudo de Lebon et al. (2003), em França, em vinha, com a T_c potencial da vinha calculada empiricamente em função da R_n , da fracção da R_n interceptada pela cultura, do albedo e da ETP, ajustada por um coeficiente de stresse hídrico obtido pela simulação do balanço hídrico do solo e E_s calculada com o modelo bifásico de Ritchie (1972), boa aderência entre o teor de água no solo simulado e o estimado com sonda de neutrões em 3 dos 4 anos analisados.

2.6. Modelação da evapotranspiração em consociações de culturas

A consociação de culturas é uma prática tradicional de cultivo com raízes ancestrais em países como a China e a Índia, e em África e na América do Sul (Knörzer et al, 2009;. Brooker et al, 2015) estando ainda presentemente muito difundida nessas regiões e recebendo cada vez maior atenção em muitas áreas regadas e com escassez de água (Zheng et al., 2010;. Li et al., 2011b; Yang et al., 2011; Zhu et al., 2012; Fan et al., 2013; Gao et al., 2014). O interesse pelas consociações, envolvendo maioritariamente cereais e leguminosas, é resultado das vantagens ao nível da produção que podem ser obtidas relativamente àquelas alcançadas em monocultura (Kanton e Dennett, 2004;. Mao et al., 2012), nomeadamente em consociações de cereais como seja a consociação trigo-milho objecto do presente estudo (Li et al., 2001; Zhang e Li., 2003; Yang et al, 2011;. Qin et al, 2013;.. Gao et al, 2014). No entanto, esta vantagem na produção não tem sido observada para todas as combinações de culturas ou, pelo menos, para uma das culturas consociadas (Coll et al., 2012). No caso da consociação trigo-milho, Li et al. (2011b) e Liu et al. (2013) reportaram uma subprodução do milho relativamente à obtida em regime de monocultura; no entanto, o trigo produziu mais do que em monocultura e a produção total de grão por unidade de área foi maior em consociação do que aquela calculada pela soma ponderada de ambas as culturas quando cultivadas individualmente.

Tal como analisado por Knörzer et al. (2009), Malezieux et al. (2009), Lithourgidis et al. (2011) e Brooker et al. (2015), uma maior produção pode resultar de uma variedade de factores. Vários autores referem uma melhor eficiência de utilização da radiação, particularmente devido a um ‘efeito de fronteira’ (Keating e Carberry, 1993;. Li et al, 2001; Tsubo et al, 2001;. Caviglia et al. , 2004; Knörzer et al, 2011;.. Munz et al, 2014). Outros descrevem um uso mais eficiente dos fertilizantes pelas culturas quando consociadas, particularmente de azoto (Szumigalski e Van Acker, 2006; Li et al., 2011a, c;. Gao et al., 2014)

e fósforo (Zhang et al, 2011b), e que a consociação promoveu a manutenção da fertilidade do solo (Zhang e Li, 2003;. Song et al, 2007;. Wang et al, 2015). Os autores referidos salientam também a importância de uma adequada fertilização para a obtenção de maiores produções relativamente ao regime de monocultura. Recentemente, Cao et al. (2015) concluiu que a consociação do trigo com o milho ou com o girassol conduziu a um melhor controlo de doenças, fungos e bolores no trigo. Também, ao nível ambiental, existem estudos que referem as vantagens das consociações, nomeadamente as resultantes da redução das emissões de carbono (Qinet al., 2013).

Relativamente ao uso da água, existe alguma controvérsia: por um lado, alguns estudos referem uma melhoria da eficiência do uso da água, relacionada com a obtenção de produções mais elevadas (Kanton e Dennett, 2004; Gao et al, 2009; Baldé et al., 2011; Yang et al, 2011); por outro lado, vários estudos demonstram que a quantidade de rega é maior do que em monocultura (Chai et al, 2011; Yang et al, 2011). Atente-se no entanto para o facto da eficiência da utilização da água ser promovida por práticas de preparação ou de gestão do solo que favoreçam a captação de água da chuva e o seu armazenamento na zona radicular (Baldé et al, 2011; Caviglia et al, 2004;. Fanet al, 2013;. Yin et al, 2013). Em consociações de culturas, um melhor uso da água do solo é alcançado quando as culturas têm sistemas radiculares com diferentes arquitecturas, por exemplo, quando as raízes de uma delas apresentam elevada expansão lateral e em profundidade, sendo capazes de extrair água abaixo das raízes da outra (Li et al, 2006, 2011b;. Yang et al., 2010). Além disso, conforme discutido por Brooker et al. (2015), um melhor uso da água pode ser obtido quando uma das culturas tem necessidades hídricas reduzidas.

A maioria dos artigos supracitados referem-se a consociações trigo de primavera-milho de verão (T-M) do tipo *relay strip intercropping*, i.e., quando o milho é plantado nas faixas incultas localizadas entre as faixas cultivadas com o trigo numa altura em que o trigo já se encontra num estado avançado do seu ciclo de desenvolvimento. Aquele tipo de consociação com aquelas culturas é bastante comum em zonas regadas no norte da China e encontra-se bem estudado do ponto de vista agronómico. Contrariamente, a consociação: trigo de primavera-girassol (T-G) começou a expandir-se apenas recentemente, sendo limitado o número de estudos associados (Feng et al., 2005; Coll et al., 2012; Cao et al., 2015).

Em contraste com os numerosos e detalhados estudos agronómicos, poucos estudos se debruçaram sobre a evapotranspiração, o uso da água e a gestão da rega em consociações. Gao et al. (2009) calculou coeficientes culturais para a consociação de trigo de inverno-milho

de verão, embora este sistema seja muito diferente do sistema trigo de primavera-milho de verão habitualmente adoptado nas grandes planícies do norte da China (na bacia inferior do rio Amarelo) e no corredor de Hexi, que é o abordado no presente estudo. Chai et al. (2011) focou-se na determinação da ET_c e da E_s em sistemas T-M, enquanto que Yang et al. (2011) na avaliação do uso da água nesse mesmo sistema. No entanto, atendendo à necessidade imperativa em poupar água e lidar com a salinidade (Xu et al., 2010, 2011, 2013), a informação actualmente disponível é insuficiente para suportar uma adequada programação da rega e o desenvolvimento de alternativas conducentes à poupança de água, o que conduz à necessidade de desenvolver novas abordagens para avaliar os actuais calendários de rega e para determinar coeficientes culturais em consociações W-M e W-S em Hetao.

A complexidade dos sistemas de consociação de culturas requer a utilização de modelos para a simulação da ET_c e da rega. Neste sentido foram desenvolvidas várias abordagens, como seja a aproximação dos coeficientes culturais ponderados proposta por Allen et al. (1998), onde a fracção do solo cultivada com cada uma das culturas e a altura destas são usadas para obter K_c combinado para o sistema ($K_{c\ pond}$), tendo sido utilizada com sucesso para a simulação do balanço hídrico do solo em consociações T-M e T-G (Pereira et al, 2007; Zheng et al, 2010;.. Zhu et al, 2012). Um tipo diferente de abordagem foi utilizada por Ozier-Lafontaine et al. (1997), que desenvolveu um modelo mecanístico baseado numa descrição bidimensional do copado que resolve a equação do balanço de energia à superfície simulando a distribuição de folhas expostas e não-expostas à luz solar em ambas as culturas. Brisson et al. (2004) seguiu esta abordagem e modificou o modelo determinístico STICS para estimar as necessidades hídricas de ambas as culturas com base na partição da radiação entre elas. Mais recentemente, Knörzer et al. (2011) modificou os modelos CERES-trigo e CERES-milho através da introdução de um algoritmo de sombreamento para simular as mudanças micro-climáticas em sistemas W-M. Munz et al. (2014) também usou um modelo de partição da radiação solar para estudar as consequências da largura das linhas de cultivo, da altura das culturas, do LAI e das condições de nebulosidade na disponibilidade de luz para as duas culturas. Li et al. (2015) relatou a utilização do modelo 2D Hydrus para a consociação milho-tomate.

2.7. Modelação da evapotranspiração em condições de salinidade do solo

A rega é essencial para acompanhar a crescente procura de alimentos e matérias primas, estimando-se em cerca de 260 milhões de hectares a área regada a nível mundial, representando apenas 17% da terra arável e da área de cultivo permanente, mas produzindo

40% do total de alimentos e fibras (FAO, 2014). No entanto, más práticas de gestão da água para a rega, que incluem a utilização de águas de qualidade marginal com elevado teor de sais, a aplicação de quantidades inadequadas para a lavagem dos sais acumulados na zona radicular ou a aplicação excessiva de rega que faz subir o nível de toalhas freáticas salinas e favorece a migração de sais para a zona radicular, conduziram a problemas graves de salinização em zonas com escassez de água (Tilman et al., 2002; Oster and Wichelns, 2003; Qadir and Oster, 2004; Pereira et al., 2009). Estima-se que entre 20 a 30 milhões de hectares de terra agrícola foram já severamente afectadas pela salinidade por todo o mundo, e que todos os anos 28 000 a 40 000 hectares se perdem para produção agrícola (Qadir et al., 2014). Práticas de rega sustentável com recurso a águas salinas exigem uma gestão da rega bem orientada para ultrapassar os problemas referidos (Rhoades et al., 1992; Sharma and Minhas, 2005; Hoffman and Shalevet, 2007; Pereira et al., 2014), o que inclui métodos adequados para a avaliação da salinidade (Rhoades et al., 1999; Letey et al., 2011; Wallender and Tanji, 2012) que permitam obter conhecimentos sobre as relações entre as culturas, o clima, o solo e a qualidade das águas de rega. Poder-se-á então prever e minimizar os impactos a curto e longo prazo da utilização de águas salinizadas nas propriedades físico-químicas do solo, na qualidade das águas subterrâneas, nas produções obtidas e no meio ambiente, assim como as consequências socioeconómicas da degradação dos solos devido à salinidade.

A quantificação precisa da transpiração das culturas e dos fluxos de evaporação do solo em ambientes com stresse salino é um bom exemplo da necessidade do bom entendimento das relações referidas anteriormente, já que são essenciais para o cálculo do balanço hídrico do solo, programação das regas e avaliação do desenvolvimento da salinidade. Esses fluxos podem ser estimados com recurso a soluções no estado estacionário, que usam representações simples das culturas e dos solos, e assumem que a concentração de sais e o teor de água do solo se mantêm constantes no tempo num dado ponto, ou considerando soluções em regime transitório que têm em conta a variação das condições ao longo do tempo, incluindo as dinâmicas da água do solo e a acumulação de sais e desenvolvimento da salinidade.

As soluções em regime estacionário podem utilizar abordagens analíticas (Letey et al., 1985; Shani et al., 2007) ou abordagens numéricas de base física (Raats, 1975, 1981; Hoffman e van Genuchten, 1983; Bresler e Hoffman, 1986; Skaggs et al., 2014) para simular a redistribuição e a drenagem da água no solo, a acumulação de sais e a absorção de água pelas raízes. No entanto, só uma pequena parte destas soluções têm a capacidade de levar em consideração as reduções na absorção de água pelas raízes devido ao stresse salino, como seja o caso do

modelo ‘água-produção’ desenvolvido por Letey et al. (1985). Estes autores combinaram a relação entre a produção e a ET, entre produção e salinidade na zona da radicular, e entre a salinidade na zona radicular e a fracção de lavagem (LF), baseando-se na função de resposta da produção à salinidade do solo em regime estacionário de Maas e Hoffman (1977) e no modelo de Hoffman e van Genuchten (1983) para o cálculo da salinidade média na zona radicular. Allen et al. (1998) desenvolveu uma função para a redução da ET_c , com base na função salinidade-produção de Ayers e Westcot (1985) e Rhoades et al. (1992), que usa um coeficiente de stresse dependente da água disponível no solo, do valor actual da condutividade eléctrica do extracto de saturação do solo (EC_e) comparativamente ao limiar de EC_e tolerado pela cultura, e a taxa de diminuição da produção por unidade de aumento de EC_e depois desse limiar ter sido ultrapassado. Esta abordagem foi modificada por Pereira et al. (2007), com base nos estudos de Beltrão e Ben Asher (1997), por forma a contemplar restrições adicionais impostas à absorção de água pelas raízes devido ao stress salino, que mais tarde foi adoptado e testado num modelo de balanço hídrico do solo e produção desenvolvido por Domínguez et al. (2011). Katerji et al. (1996) e Lamsal et al. (1999) utilizaram uma abordagem mais simplificada através da extensão do uso da função de água-produção de Stewart et al. (1977). Sperling et al. (2014) calcularam o efeito do stresse salino na taxa de transpiração de palmeiras baseando-se nos níveis de salinidade, na resistência de superfície da cultura e no modelo de Penman-Monteith.

Soluções mais complexas em regime estacionário incluem o trabalho de Shani et al. (2007), que modelou a redução na transpiração como o produto da condutividade hidráulica não-saturada do solo, do gradiente de potencial hídrico entre o solo e as raízes, e da função sigmóidal desenvolvida por van Genuchten e Gupta (1993), de forma considerar o stress salino. Esta abordagem foi alterada por Ben-Gal et al. (2008) com o objectivo de melhorar as estimativas da fracção de lavagem do solo. Mais recentemente Skaggs et al. (2014) introduziram um termo associado à absorção de água na equação diferencial usada para calcular o fluxo de drenagem. A absorção de água pelas raízes foi modelada por forma a poder ser reduzida devido à ocorrência de stresses matriciais e osmóticos variáveis com a profundidade. Já Mau e Porcorato (2015) desenvolveram a um conjunto de equações diferenciais para a modelação da concentração de sais e reacções de troca catiónica assumindo condições estacionárias do teor de água do solo e da ET.

As soluções para o regime transitório encontram-se geralmente implementadas em modelos mecanísticos (Corwin et al., 2007; Letey e Feng, 2007; Oester et al., 2012), que adoptam

normalmente uma abordagem macroscópica para considerar o efeito do stress salino na transpiração das culturas (Feddes et al., 1978; Skaggs et al., 2006a; Simunek e Hopmans, 2009). Apesar de serem fundamentalmente diferentes dos modelos para o estado estacionário, os modelos mecanicistas para o estado transitório incluem as mesmas equações propostas por Maas e Hoffman (1977), van Genuchten (1987), van Genuchten e Gupta (1993) e Homaei et al. (2002) para contemplar a redução da transpiração em ambientes com stress salino. A principal limitação dos modelos mecanicistas é requererem um substancial investimento na aquisição dos dados de entrada, na parametrização e na calibração, o que os tornam demasiado complexos para serem usados em aplicações de rotina, nomeadamente para a programação da rega. Pelo contrário, os modelos de balanço hídrico do solo são relativamente mais simples, menos exigentes em relação à quantidade de dados de entrada, embora possam também considerar, se bem que com mais limitações, a variação temporal das condições experimentais de campo, na modelação do teor de água do solo e do efeito do stress salino na absorção de água pelas raízes, como sejam, por exemplo, os modelos BUDGET (Raes, 2002), ISAREG (Pereira et al., 2007) e MOPECO (Domínguez et al., 2011). Embora os modelos de balanço hídrico do solo possam, quando devidamente calibrados, por exemplo, por medições do teor de água do solo, fornecer estimativas fidedignas da ET_c (Allen et al., 2012), o facto de considerarem simplisticamente o domínio do solo, e utilizarem abordagens empíricas para a determinação dos outros fluxos de entrada e de saída de água da zona radicular, incapacita-os de estimar a distribuição da água e dos sais ao longo do perfil do solo, o que constituiu uma clara limitação em relação aos modelos mecanísticos.

2.8. Modelação da evapotranspiração e do uso da água ao nível do projecto de rega; aplicações SIG

Vários exemplos da conjugação de modelos de balanço hídrico do solo e sistemas de informação geográfica (SIG) têm surgido ao longo das últimas décadas. A maioria destes sistemas de gestão da rega baseados em SIG, tem como objectivos principais a estimação das necessidades de rega sob diferentes cenários quanto à distribuição espacial das culturas, métodos e gestão da rega, restrições de água, etc., ou quanto às condições climáticas (por ex., ano seco, médio e húmido). Deste modo podem identificar-se os cenários que conduzem a um melhor uso da água e as áreas com excesso ou défice de água. É disto exemplo o sistema SIG-gestão da rega de Todorovic e Steduto (2003), que integra o modelo CROPWAT (FAO, 1992) para estimação das necessidades de rega, e aproximações mecanísticas (combinação dos modelos CropSyst e EPIC – Guerra et al., 2005) e estatísticas para estimar a produtividade

das culturas, destinado ao uso pelos consórcios de rega e instituições governamentais, podendo ser aplicado a várias escalas espaciais e níveis administrativos. Com objectivos similares, Fortes et al. (2005) desenvolveram o modelo GISAREG, que nasceu da integração do modelo de balanço hídrico do solo e calendarização da rega à escala da parcela - ISAREG, com um SIG. George et al. (2004) modificaram o modelo de balanço hídrico ISM (George et al., 2000) por forma a capacitá-lo para a simulação das necessidades de rega da cultura do arroz e integraram-no num SIG, tendo este modelo conseguido, depois de validado numa área pequena servida por um canal secundário, detectar insuficiências no fornecimento de água ao nível da área servida pelo canal principal, e propor e validar uma cultura alternativa. Zhiming et al. (2007) estenderam para o nível da região de Jing-Jin-Ji, localizada no vale do rio Haihe, China, as capacidades de simulação do balanço hídrico do solo e das necessidades de rega do modelo CROPWAT, com o objectivo de estimar: i) a distribuição espacial da ET_c do milho; ii) o défice hídrico climático; iii) a redução da produção do milho sob diferentes condições em sequeiro e em regadio. Chowdary et al. (2003) estabeleceram a ligação entre um modelo de balanço hídrico do solo diário para cálculo da percolação abaixo da zona radicular, um modelo de simulação das perdas de água por infiltração em canais de distribuição e um SIG, para estimar a distribuição espacial da recarga de aquíferos e escoamentos subterrâneos, sendo o SIG responsável por criar unidades homogéneas de simulação quanto aos factores que influenciam a percolação nas parcelas cultivadas e as perdas por infiltração em canais. Um outro aspecto que é uma mais valia para estes sistemas de gestão da rega baseados em SIG é a utilização da detecção remota a partir de satélites em órbita terrestre. Tal como referido na Secção 2.2.3, as imagens obtidas por estes satélites permitem o cálculo de índices de vegetação que podem ser relacionados através de simples modelos lineares com parâmetros característicos das culturas, como sejam o K_{cb} e a f_c , e assim estimar de forma relativamente expedita a variabilidade espacial da ET_c .

Capítulo 3

O modelo SIMDualKc

3.1. Introdução

O conhecimento das necessidades hídricas das culturas, i.e., a ET_c (mm), e a sua consideração em modelos de simulação do balanço hídrico do solo permite otimizar a oportunidade e a quantidade de rega, atendendo à evolução temporal daquelas necessidades, às contribuições de água da precipitação e águas subterrâneas, e a limiares críticos da água do solo.

O método dos coeficientes culturais (K_c) - evapotranspiração de referência (ET_o , mm) é um método com uma grande divulgação para estimar a ET_c , mas tornou-se relativamente complicado com a introdução da abordagem dos K_c duais. Nesta abordagem o valor do K_c é obtido como a soma de duas componentes, o coeficiente cultural de base (K_{cb}), representando a transpiração das culturas (T_c) embora tenha implícito a evaporação residual do solo, e o coeficiente de evaporação do solo (K_e), representativo da evaporação da água a partir da camada superficial do solo (E_s), pretendendo-se com este procedimento melhorar as estimativas da ET diária das culturas. A abordagem dos K_c duais permite estimar com maior precisão os impactos de factores como a frequência da rega e da precipitação, do método de rega e da utilização de *mulches* no consumo total de água pelas culturas. Por outro lado o cálculo separado das duas componentes da ET_c , permite que aspectos relacionados apenas com a T_c sejam mais correctamente contabilizados, como seja o impacto do stress hídrico causado por baixos valores dos potenciais matricial e osmótico da água do solo.

O modelo SIMDualKc (Rosa et al., 2012a, b) foi desenvolvido com o objetivo de simplificar a implementação da metodologia dos K_c duais e conjugá-la com vários módulos que contemplam a simulação de práticas de gestão do solo (*mulches* e coberturas vegetais activas) e de gestão das culturas (consociações de culturas), stresses ambientais (salinidade do solo) e extensões hidrológicas para aumentar a capacidade de simulação do balanço hídrico do solo, como sejam a aproximação paramétrica de cálculo da ascensão capilar e da percolação profunda (Liu et al., 2006) e o método do *Curve Number* (USDA-SCS, 1972; Allen et al., 2007b) para estimação do escoamento superficial.

3.2 Metodologia e base teórica para o desenvolvimento do modelo

3.2.1. Coeficientes culturais duais

Existem duas abordagens para o cálculo da evapotranspiração das culturas (ET_c) a partir da evapotranspiração de referência (ET_o): a primeira usa um K_c simples ou médio, que combina os efeitos da T_c e da E_s no tempo, por exemplo, durante os estádios de desenvolvimento das culturas (Fig. 3.1); a segunda adota um K_c dual, por forma a determinar separadamente e diariamente a T_c e a E_s ; assim, $K_c = K_{cb} + K_e$, (Fig. 3.1). Estas abordagens para o cálculo da ET_c são descritas pelas seguintes equações:

$$ET_c = K_c ET_o \quad (3.1a)$$

$$ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_o \quad (3.1b)$$

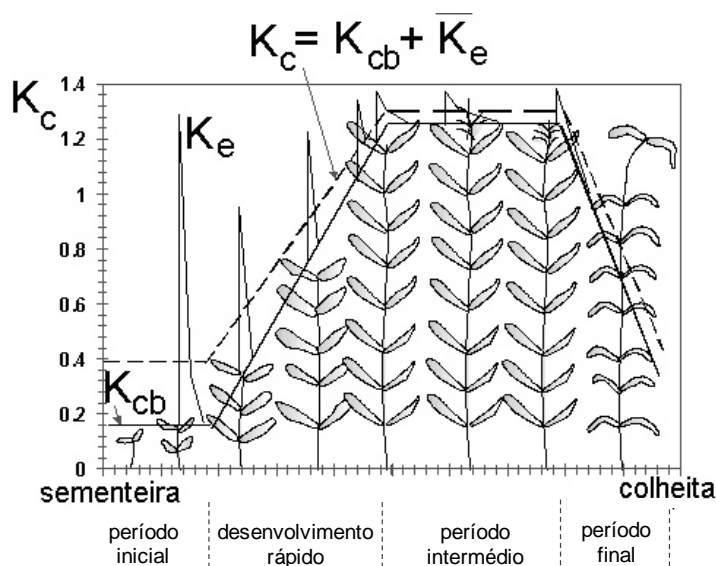


Fig. 3.1. Curvas dos coeficientes culturais: coeficiente cultural basal - K_{cb} (linha contínua mais espessa), coeficiente de evaporação do solo - K_e (linha contínua mais tênue) e K_c simples ou médio (linha a tracejado), dado como a média temporal da soma de K_{cb} e K_e , i.e., $K_c = \overline{K_{cb}} + \overline{K_e}$ (adaptado de Pereira, 2004).

Na Fig. 3.2 apresenta-se um resumo dos procedimentos utilizados no modelo SIMDualKc para o cálculo da ET_c através da abordagem dos K_c duais. A ET_o pode ser calculada pelo próprio modelo através da equação FAO-PM (Allen et al., 1998, 2007b) ou, alternativamente, ser calculada externamente, utilizando aquele método ou um outro qualquer, e depois importada para a base de dados (BD) do modelo. Os valores de K_{cb} especificados pelo utilizador podem corresponder a valores determinados experimentalmente para o local onde o modelo vai ser aplicado, ou simplesmente a valores existente na literatura, como os

disponibilizados por Allen et al. (1998) e por Allen e Pereira (2009), sucedendo neste último caso que se a ET_o foi calculada com outra equação que não a FAO-PM e depois importada para a BD do modelo, os valores tabelados podem ter que ser ajustados. Os valores de K_{cb} também podem ser obtidos a partir de valores conhecidos do K_c simples/médio, como descrito por Pereira e Allen (1999) e Pereira et al. (2006). As fases ‘padrão’ de desenvolvimento das culturas preconizadas inicialmente por Doorenbos e Pruitt (1977) e posteriormente por Allen et al. (1998): inicial, crescimento rápido, período intermédio (*mid-season*) e período final (*late-season*), são por norma utilizadas para a construção da curva do K_{cb} (Fig. 3.1).

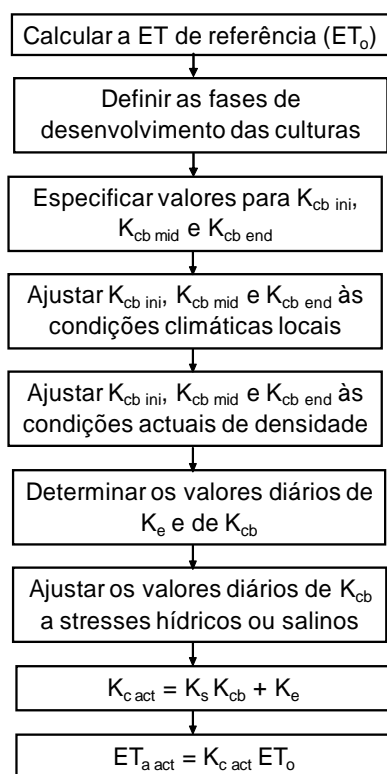


Fig. 3.2. Fluxograma mostrando os passos necessários para o cálculo da evapotranspiração cultural actual ($ET_{c \text{ act}}$) através da metodologia dos K_c duais (Rosa et al., 2012).

3.2.1.1. Coeficiente cultural de base (K_{cb})

O coeficiente cultural de base (K_{cb}) é definido como a relação entre a ET da cultura e a ET de referência (ET_c / ET_o) quando a superfície do solo está seca, mas em condições em que a transpiração não é limitada pela disponibilidade de água no solo. Portanto, $K_{cb} ET_o$ representa principalmente a componente transpirativa da ET_c . O K_{cb} tem no entanto implícito a evaporação residual do solo, i.e., a vaporização e lenta difusão de vapor de água a partir de camadas húmidas situadas abaixo da camada superficial evaporativa (10-15 cm) quando esta se encontra seca, razão pela qual o K_{cb} não é geralmente definido como zero durante a fase

inicial do ciclo de desenvolvimento das culturas anuais (Allen et al., 1998). A evolução diária dos valores de K_{cb} ao longo do ciclo de desenvolvimento das culturas, ou ‘curva do K_{cb} ’, requer a especificação de três valores para K_{cb} : $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$ e $K_{cb\ end}$, respectivamente, os valores médios de K_{cb} durante os estádios inicial e intermédio (máxima cobertura), e o valor do K_{cb} no final do ciclo (Doorenbos e Pruitt, 1977; Allen et al., 1998, 2005b, 2007b); estes valores são depois interpolados para a obtenção dos valores diários (Fig. 3.1). Alternativamente, a curva do K_{cb} pode ser construída através da especificação de valores do K_{cb} em determinadas datas ao longo do ciclo de desenvolvimento, que são depois interpolados aquando da execução do modelo para a obtenção dos valores diários. Na secção 3.2.2 é descrita uma forma alternativa de construir a curva do K_{cb} , quer a partir dos estádios padrão de desenvolvimento quer a partir de datas específicas.

Allen et al. (1998, 2007b) e Allen e Pereira (2009) listaram valores recomendados de K_{cb} para a quase totalidade das culturas agrícolas conhecidas. Para efeitos de padronização, os valores apresentados referem-se a um clima sub-húmido com $RH_{min} \approx 45\%$ e com velocidade do vento (u_z) moderada, em média 2 m s^{-1} . Assim, o K_{cb} precisa de ser ajustado para as condições climáticas locais quando a RH_{min} diferir de 45% ou quando u_z se afastar de 2 m s^{-1} . Os valores de $K_{cb\ mid}$ (e os valores de $K_{cb\ end}$ quando maiores do que 0.45) são ajustados da seguinte forma:

$$K_{cb} = K_{cb\ (Tab)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \quad (3.2)$$

onde $K_{cb\ (Tab)}$ é o valor apresentado por Allen et al. (1998, 2007b) e Allen e Pereira (2009) para $K_{cb\ mid}$ (e para $K_{cb\ end}$ quando > 0.45), e u_2 , RH_{min} e h são, respectivamente, o valor médio da velocidade do vento a 2 m de altura [m s^{-1}], o valor médio da humidade relativa mínima diária [%] e a altura média da cultura durante o período médio ou final.

Os valores para u_2 e RH_{min} estão limitados a $1\text{ m s}^{-1} \leq u_2 \leq 6\text{ m s}^{-1}$ e $20\% \leq RH_{min} \leq 80\%$ aquando do ajustamento. Valores fora destes intervalos devem ser igualados aos extremos dos intervalos. O ajuste feito ao $K_{cb\ mid}$ (ou $K_{cb\ end}$) nesta equação explica os impactos do clima na amplificação das diferenças entre a cultura em causa e a cultura de referência (o relvado padrão) em termos da resistência aerodinâmica, como discutido em Pereira et al. (1999). Os valores de K_{cb} também podem necessitar de serem ajustados para a densidade actual da cultura, como discutido na secção 3.2.2, ou para stresses hídrico e/ou salinos (secção 3.2.4) e práticas de gestão das culturas, do solo e da rega (secção 3.3.3)

3.2.1.2. Coeficiente de evaporação do solo (K_e)

O coeficiente de evaporação do solo (K_e) é máximo quando a camada superficial do solo se encontra humedecida, após uma chuvada ou uma rega, e quando a fracção do solo coberta pela cultura é mínima. A evaporação do solo na fracção sombreada pela cultura e na fracção exposta, seguindo Ritchie (1972) e Saxton et al. (1974), é estimada com base na quantidade de energia disponível à superfície do solo em conjunto com a energia consumida pela transpiração (Allen et al., 1998, 2007b). Sempre que a superfície do solo estiver humedecida e exposta à radiação, estima-se que a evaporação ocorra a uma taxa máxima, e portanto o valor de K_e é máximo, embora sujeito à soma $K_{cb} + K_e$ estar limitada a um valor máximo de K_c ($K_{c\max}$), que representa um limite superior à E_s e T_c de qualquer superfície cultivada e que é imposto para refletir as restrições naturais impostas à energia disponível. À medida que a superfície do solo vai secando, a água disponível para a evaporação diminui, sendo a redução da E_s proporcional à quantidade de água remanescente na camada superficial do solo. Assim, K_e é calculado por:

$$K_e = K_r (K_{c\max} - K_{cb}) \leq f_{ew} K_{c\max} \quad (3.3)$$

onde K_r é um coeficiente de redução da evaporação (adimensional) que depende do nível de depleção da água na camada superficial do solo (por evaporação), $K_{c\max}$ é o valor máximo de K_c em qualquer coberto vegetal após uma chuvada ou uma rega, e f_{ew} é a fracção do solo que está simultaneamente exposta e humedecida, isto é, a fracção da superfície do solo a partir da qual ocorre a maior parte da evaporação. As equações para o cálculo de $K_{c\max}$, K_r e f_{ew} são apresentadas na Tabela 3.1.

O K_r é calculado utilizando um ciclo bifásico de dissecação (Ritchie, 1972; Allen et al., 1998, 2005b), no qual a primeira fase depende apenas da energia disponível e a segunda está condicionada pela disponibilidade de água, durante a qual a evaporação diminui à medida que a água evaporável ultrapassa e vai decrescendo abaixo da água facilmente evaporável (REW) na camada superficial do solo (Tabela 3.1).

Faz-se no entanto notar que a equação 3.3 e as equações apresentadas na Tabela 3.1 não são as efectivamente utilizadas pelo modelo, que usa uma abordagem mais complexa tal como apresentada no ponto 3.2.5, servindo aquelas apenas de suporte para as considerações feitas acima para uma mais fácil compreensão do problema.

Tabela 3.1 Resumo das equações utilizadas no cálculo de K_e (de Allen et al., 1998, 2005b).

$$K_{c \max} = \left(\left\{ 1.2 + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \right\}, \{K_{cb} + 0.05\} \right)$$

$$K_r = \frac{TEW - D_{e,i-1}}{TEW - REW} \quad \text{se } D_{e,i-1} > REW$$

$$K_r = 1 \quad \text{se } D_{e,i-1} \leq REW$$

$$f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w) \quad \text{com } f_c = \left(\frac{K_{cb} - K_{c \min}}{K_{c \max} - K_{c \min}} \right)^{1+0.5h} \quad \text{ou } f_c \text{ medida no campo}$$

Nota: u_2 , RH_{\min} e h são, respectivamente, as médias da velocidade do vento média a 2 m de altura [m s^{-1}], da humidade relativa mínima [%] e da altura da cultura em cada fase de desenvolvimento ou, alternativamente, os os valores diários destas variáveis; $D_{e,j-1}$ é a depleção da água na camada superficial do solo no fim do dia anterior [mm]; TEW é o total de água evaporável [mm]; f_w é a fração da superfície do solo humedecida pela rega ou precipitação; f_c é a fração do solo coberto ou sombreado pela vegetação; e $K_{c \min}$ é o valor mínimo de K_c para solo não vegetado. Os restantes parâmetros ($K_{c \max}$, K_r , REW e f_{ew}) são descritos acima no texto.

3.2.2. Ajustamento do K_{cb} à densidade e altura das culturas

O valor de K_{cb} diminui quando a densidade ou a área foliar das plantas (LAI) é inferior à verificada em condições de cobertura total do solo, decrescendo proporcionalmente à quantidade de vegetação. Assim, o K_{cb} , como representa principalmente a transpiração, está correlacionado com a quantidade de vegetação e pode ser expresso em função de um coeficiente de densidade da cultura, K_d (Allen et al., 2007b; Allen e Pereira, 2009):

$$K_{cb} = K_{c \min} + K_d (K_{cb \text{ full}} - K_{c \min}) \quad (3.4)$$

em que os impactos da densidade da cultura e/ou do LAI são representados pelo K_d , $K_{cb \text{ full}}$ é o K_{cb} estimado para uma determinada cultura em condições de cobertura total ou quase total do solo (ou $LAI > 3$) e ajustado ao clima, e $K_{c \min}$ é o valor mínimo de K_c para solo não vegetado e seco à superfície, representando a evaporação residual a partir de camadas húmidas abaixo da camada superficial evaporativa, cujo valor é de cerca de 0.15 em condições agronómicas típicas, podendo variar de 0.0 a 0.15 em função da frequência da precipitação e da rega. No modelo os valores de $K_{cb \text{ full}}$ são especificado para os estádios inicial e intermédio, e para o fim do ciclo, enquanto que o K_d pode ser calculado para aqueles períodos ou ser calculado em determinadas datas ao longo do ciclo de desenvolvimento por forma a fornecer um maior detalhe aquando da construção da curva dos K_{cb} .

Em pomares é comum a presença de vegetação natural no solo ou mesmo serem semeadas certas espécies de gramíneas com o objetivo de aumentar a infiltração da água das chuvas, reduzir a erosão do solo e para controlar as espécies infestantes. No entanto, esta cobertura vegetal activa (CVA) compete com as árvores (ou arbustos) pela água disponível no solo e contribui para a ET total do pomar. Por forma a considerar o contributo da CVA para ET total foi adoptada no SIMDualKc a abordagem de Allen et al. (2007b) e Allen e Pereira (2009) expressa como:

$$K_{cb} = K_{cb\ cover} + K_d \left(\max \left[K_{cb\ full} - K_{cb\ cover}, \frac{K_{cb\ full} - K_{cb\ cover}}{2} \right] \right) \quad (3.5)$$

onde $K_{cb\ cover}$ é o K_{cb} da CVA que se verificaria na ausência de folhagem nas árvores, K_d é o factor de densidade das árvores ou arbustos, e $K_{cb\ full}$ é o K_{cb} esperado para a cultura quando em condições de cobertura total do solo e ajustado ao clima. O segundo termo da função *max* ('máximo entre') reduz para metade a diferença entre $K_{cb\ full}$ e $K_{cb\ cover}$ quando esta diferença é negativa. Este procedimento tem o intuito de considerar a redução na transpiração da CVA quando sombreada por árvores que tenham um K_{cb} menor do que o da CVA, por exemplo, devido a uma elevada resistência estomática. O valor de $K_{cb\ cover}$ na Eq. (3.5) deve representar o K_{cb} da CVA em condições de crescimento em 'campo aberto', uma vez que, no fundo, a Eq. (3.5) estima o aumento ou a diminuição do K_{cb} de uma parcela com uma CVA quando uma árvore de maiores dimensões ou outra cultura passa a ocupar uma fracção (f_c) da CVA sombreando-a. O valor de $K_{cb\ cover}$ deverá então reflectir a densidade e o vigor da CVA nas zonas expostas à luz solar.

O esquema apresentado na Fig. 3.3 mostra a abordagem seguida pelo modelo por forma a ajustar o K_{cb} às condições de cobertura do solo (Allen et al., 2007b; Allen e Pereira, 2009). Os valores de $K_{cb\ full\ i}$ são calculados em função da altura máxima da cultura (h_{max}), do parâmetro F_{ri} [0-1] relativo ao controlo estomático da cultura e das condições climáticas ($u_{2\ i}$ e $RH_{min\ i}$). O subscrito *i* nestas variáveis refere-se à fase de desenvolvimento da cultura (inicial, intermédia e fim do ciclo), correspondendo portanto F_{ri} , $u_{2\ i}$ e $RH_{min\ i}$ a valores médios durante aquelas fases. Os valores de K_{di} são calculados em função da fracção do solo efectivamente coberta pela cultura ($f_{c\ eff\ i}$), da altura da cultura (h_i) e do parâmetro M_L [1.5-2.0], um factor multiplicativo da $f_{c\ eff}$ que descreve a ET relativa máxima por fracção de solo sombreado. O subscrito *i* nestas variáveis refere-se à fase do ciclo de desenvolvimento da cultura (sendo portanto $f_{c\ eff\ i}$ e h_i valores médios durante as fases) ou, alternativamente, à data de medição de $f_{c\ eff}$ e h . Das considerações feitas acima, resulta que, ou são calculados três

valores de $K_{cb\ adj}$, para a fase inicial, intermédia e fim do ciclo, ou alternativamente, tantos valores de $K_{cb\ adj}$ quantas as datas de medição de $f_{c\ eff}$ e h .

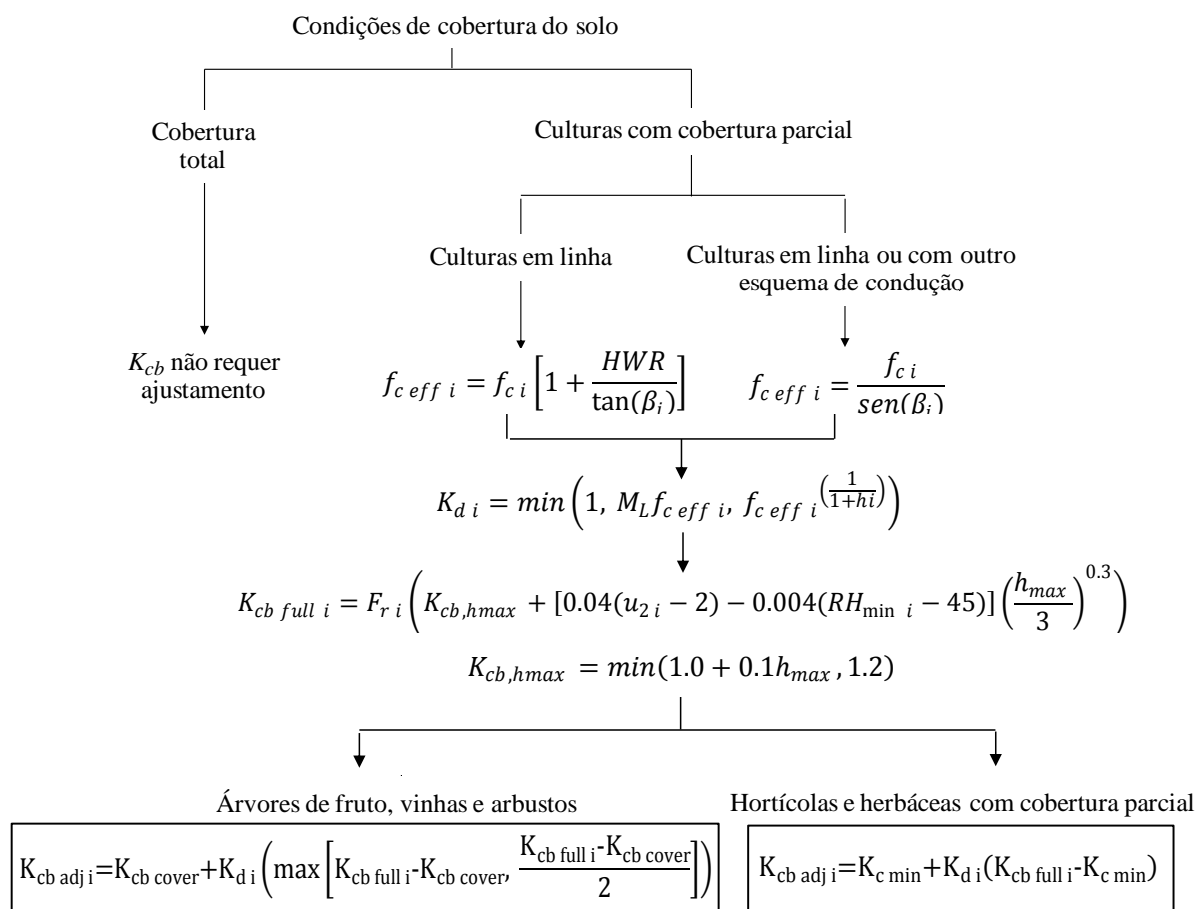


Fig. 3.3. Esquema utilizado pelo modelo SIMDualKc para o ajustamento do K_{cb} de acordo com a fração de cobertura do solo e a altura da cultura (adaptado de Rosa et al., 2012a).

A Fig. 3.3 mostra como o cálculo de K_d (e consequentemente de $K_{cb\ adj}$) difere nos caso das culturas com cobertura parcial do solo serem cultivadas em linha ou com um compasso de plantação não conducente à formação de linhas. A diferença assenta no cálculo de $f_{c\ eff}$, que pode diferir do valor que é observado verticalmente acima da cultura (f_c). Os restantes parâmetros necessários para calcular o K_d são calculados de forma semelhante para disposições em linha ou com outro tipo de compasso de plantação. Quando a disposição das culturas não forma linhas, a diferença entre f_c e $f_{c\ eff}$ envolve apenas o efeito do ângulo do sol acima do horizonte (β) na área sombreada ($f_{c\ eff}$) durante o período diurno em que a ET é máxima (Fig. 3.4), geralmente entre as 11:00 e as 15:00 horas, aspecto que é considerado pelo modelo.

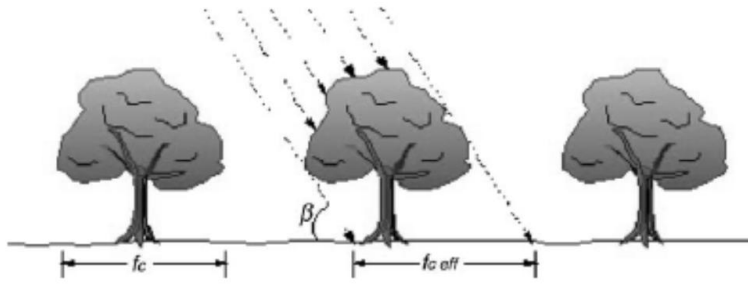


Fig. 3.4. Esquema do cálculo de $f_{c \text{ eff}}$ a partir de f_c e β , onde β é o ângulo de inclinação do Sol em relação ao horizonte no período de ET máxima (Allen e Pereira, 2009).

Para culturas em linha, o modelo requer informação adicional para calcular o termo HWR, i.e., a razão entre altura e a largura da linha de plantas (*height to width ratio*), que entra na equação de cálculo da $f_{c \text{ eff}}$ (Fig. 3.3), que envolve a determinação do ângulo da linha de plantas relativamente à direcção este-oeste (Γ), a altura das plantas (h_{canopy}) e a largura das mesmas quando observadas da direcção este-oeste (Fig. 3.5).

Faz-se notar, no entanto, que as considerações feitas acima acerca da disposição ou não das culturas em linhas, não são aplicadas pelo modelo se os valores da $f_{c \text{ eff}}$ forem obtidos experimentalmente, por exemplo, medindo *in-situ* a fracção de solo sombreada pela cultura.

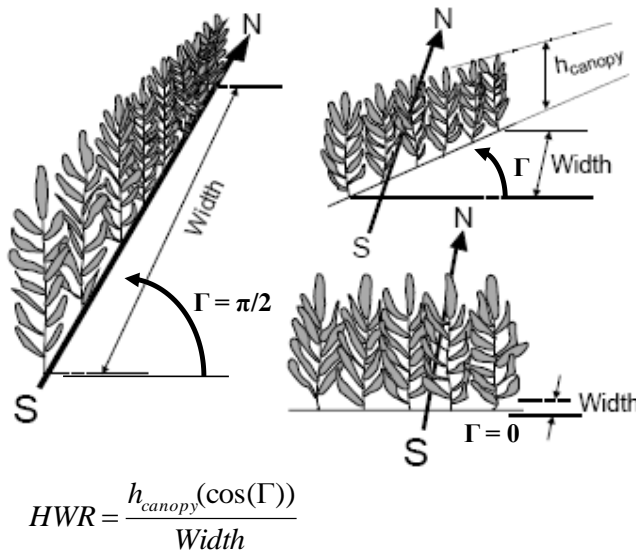


Fig. 3.5. Esquema com as principais características do cultivo em linha – largura, altura, e ângulo Γ da linha de cultivo relativamente à direcção E-O, usadas no cálculo de HWR (razão entre altura e largura) e de $f_{c \text{ eff}}$ (adaptado de Allen et al. 1998).

3.2.3. Cálculo do K_{cb} em consociações de culturas

A consociação de culturas por faixas é um sistema ou uma prática de cultivo em que duas culturas diferentes são cultivadas conjuntamente numa mesma parcela em faixas alternadas, havendo em maior ou menor grau uma interligação e uma interacção entre as partes aéreas e as raízes das duas culturas na fronteira entre faixas. Neste tipo de consociações, o desenvolvimento de uma cultura pode ser acompanhado ‘de perto’ pelo da outra, ou pelo contrário, haver um hiato temporal no desenvolvimento das duas culturas, por exemplo, se uma for plantada muito tempo após a plantação da outra. Neste último caso está-se perante uma consociação do tipo *relay-strip-intercropping*, que é o caso estudado no capítulo 5. O recurso à consociação de culturas baseia-se sobretudo nas vantagens que podem ser alcançadas ao nível da produção relativamente àquelas obtidas em monocultura, remetendo-se para o ponto 2.2.5 do Capítulo 2 as razões dessas vantagens.

A modelação da ET_c em consociações de culturas apresenta algumas dificuldades, especialmente se a diferença de altura entre as culturas consociadas for substancial e se existir um hiato temporal no seu desenvolvimento. Assim é necessário levar em consideração, implícita-ou-explicitamente, a intercepção diferenciada da radiação pelas duas culturas, a rugosidade aerodinâmica do coberto, dependente da diferença de altura entre as duas culturas (que é máxima quando uma delas está plenamente desenvolvida e a outra ainda imatura ou pelo contrário já colhida), e a advecção localizada de energia entre as faixas, especialmente importante quando uma delas ainda não está cultivada ou a cultura nela instalada é ainda muito imatura e estando a cultura da outra faixa plenamente desenvolvida, ou quando uma delas já foi colhida e a outra permanece no seu máximo desenvolvimento. Allen et al. (1998) propôs um procedimento para o cálculo do K_c (não dual, i.e., simples ou médio) em consociações por faixas ($K_{c\ pond}$), que é obtido através da ponderação dos valores do K_c das duas culturas quando cultivadas individualmente, de acordo com as fracções do solo por estas ocupadas e pela altura das culturas. No entanto este procedimento apresenta algumas limitações quando adaptado à metodologia dos K_c duais, i.e., quando aplicado não ao K_c (que representa a média temporal da T_c e da E_s) mas ao K_{cb} (que representa apenas a T_c). Assim, por exemplo, quando apenas uma das culturas está presente na parcela, ou porque a outra ainda não foi plantada ou porque a primeira já foi colhida, a utilização do procedimento de Allen et al. (1998) resulta em valores do $K_{c\ pond}$ praticamente iguais aos valores do K_c em monocultura da cultura que continua presente na sua faixa. No caso dos K_c simples ou médios, este aspecto pode ser explicado, pelo menos parcialmente, pela maior E_s ao nível da parcela

(relativamente à que se verificaria em monocultura), devido à elevada E_s na faixa de solo ainda/já não vegetada e exposta à radiação, pelo aumento da interceptação da radiação pela cultura prevalecente, pela menor resistência aerodinâmica de um coberto que se tornou mais rugoso e mais acoplado ao ar circundante devido à presença de faixas não vegetadas, e ao aumento da micro-advecção de calor sensível das faixas com solo não vegetado para a cultura prevalecente.

No caso dos K_c duais, e considerando as condições referidas acima, a aplicação do procedimento proposto por Allen et al. (1998) para a obtenção de um K_{cb} ponderado para a consociação ($K_{cb\ pond}$), resultaria em valores de $K_{cb\ pond}$ iguais aos valores do K_{cb} em monocultura da cultura que continua presente na sua faixa. Estar-se-ia portanto a admitir que, por exemplo numa consociação trigo-milho em que ambas as culturas ocupassem uma fracção de 0.5 da superfície do solo, na altura em que o trigo já tivesse sido colhido e apenas o milho permanecesse na parcela, a transpiração da parcela nesta situação seria igual à transpiração que ocorreria se a parcela estivesse totalmente cultivada com milho, o que é irrealista. Por este motivo foi desenvolvido e implementado no SIMDualKc um novo procedimento para o cálculo do $K_{cb\ pond}$ em consociações por faixas, particularmente indicado para os casos em que existe um desfaseamento temporal no desenvolvimento das duas culturas. Assim, seguindo a abordagem de Allen e Pereira (2009) para o cálculo do K_{cb} em pomares com cobertura vegetal activa, descrita em 3.2.2, poder-se-á também considerar para as consociações a interacção entre uma espécie dominante e uma espécie subordinada, como ilustrado na Fig. 3.6. Resulta então que o K_{cb} da consociação pode ser calculado como:

$$K_{cb\ inter} = \max[K_{cb\ sub} + K_{d\ dom}(K_{cb\ dom} - K_{cb\ sub}); K_{cb\ dom} + K_{d\ sub}(K_{cb\ sub} - K_{cb\ dom})] \quad (3.6)$$

onde $K_{cb\ dom}$ e $K_{cb\ sub}$ são os valores diários do K_{cb} , respectivamente, da cultura dominante e subordinada, quando cultivadas isoladamente, e $K_{d\ dom}$ e $K_{d\ sub}$ são, respectivamente, os coeficientes de densidade das culturas dominante e subordinada. Estes últimos são dados por:

$$K_{d\ dom} = f_{r\ dom} \left(\frac{1}{1 + \max(h_{dom} - h_{sub}; 0)} \right) \quad (3.7a)$$

$$K_{d\ sub} = f_{r\ sub} \left(\frac{1}{1 + \max(h_{sub} - h_{dom}; 0)} \right) \quad (3.7b)$$

onde $f_{r\ dom}$ e $f_{r\ sub}$ são, respectivamente, as fracções da superfície do solo cultivadas com a cultura dominante e com a cultura subordinada, e h_{dom} e h_{sub} são as respectivas alturas das culturas.

A função *max* na Eq. (3.6) destina-se a considerar que as condições observadas em fases anteriores, $K_{cb\ dom} > K_{cb\ sub}$ e $h_{dom} > h_{sub}$, podem alterar-se com o desenvolvimento da cultura subordinada, alterando assim as condições para $K_{cb\ sub} > K_{cb\ dom}$ e $h_{sub} > h_{dom}$. Este aspecto pode observar-se por exemplo em consociações trigo de primavera-milho na China, tal como analisado no Capítulo 5, onde, a dada altura, já após o trigo ter atingido o pleno desenvolvimento, o milho ultrapassa-o em termos de altura e área foliar, obtendo-se assim, $K_{cb\ milho} > K_{cb\ trigo}$ e $h_{milho} > h_{trigo}$.

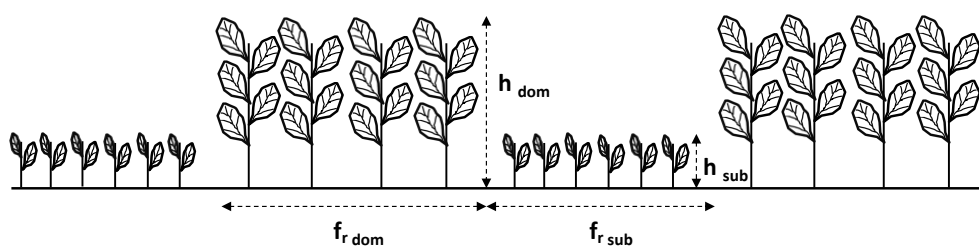


Fig. 3.6. Esquema de uma consociação de culturas por faixas e com desfasamento temporal no desenvolvimento das duas culturas, em que $f_{r\ dom}$ e $f_{r\ sub}$ são, respectivamente, as fracções do solo cultivadas com a cultura dominante e com a cultura subordinada, e h_{dom} e h_{sub} , respectivamente, as alturas da cultura dominante e subordinada.

A razão para a alteração do cálculo do K_d nas Eq. (3.7a) e (3.7b) relativamente à Eq. (3.5), é tornar K_d dependente da diferença de altura entre as duas culturas consociadas, uma vez que assim, factores como a intercepção da luz solar, rugosidade aerodinâmica do coberto, e a micro-advecção de energia entre as faixas, que estão implícitos no K_d , são mais correctamente considerados. Tomando novamente como exemplo a consociação trigo-milho acima mencionada, sabe-se que quando o milho (a cultura subordinada) começa a crescer rapidamente, o trigo (a cultura dominante) já atingiu o máximo desenvolvimento; assim, o valor de $K_{d\ dom}$ dado pela Eq. (3.7a) diminui progressivamente a partir daquele ponto, uma vez que a diferença $h_{dom} - h_{sub}$ também diminui até se anular, culminando em $K_{d\ dom} = f_{r\ dom}$. Esta abordagem tem em consideração a diminuição da intercepção da luz solar, da rugosidade do coberto, e da micro-advecção de energia para a cultura dominante, o trigo, e a consequente redução do seu valor de K_{cb} ; ao mesmo tempo, no entanto, o valor de $K_{cb\ inter}$ dado pela Eq. (3.6) está a aumentar lentamente, uma vez que o valor do $K_{cb\ sub}$ do milho aumenta devido ao desenvolvimento da cultura, havendo assim um efeito de compensação da diminuição do $K_{cb\ dom}$ do trigo através do aumento do $K_{cb\ sub}$ do milho.

3.2.4. Evapotranspiração actual e o coeficiente de stresse (K_s)

O valor actual de K_c ($K_{c\ act}$) é calculado como a soma de K_{cb} e K_e , reduzido aquando da ocorrência de stresse hídrico causado por baixos valores dos potenciais matricial ou osmótico da água do solo. Os efeitos do stresse hídrico e/ou salino no solo são descritos pelo produto do K_{cb} da cultura pelo coeficiente de stress hídrico, K_s , resultando em:

$$K_{c\ act} = K_s K_{cb} + K_e \quad (3.8)$$

Sob stresse, a evapotranspiração potencial ET_c não é alcançada, progredindo a ET a uma taxa mais baixa, correspondente à evapotranspiração actual (ET_a):

$$ET_a = K_{c\ act} ET_o \quad (3.9)$$

O coeficiente de stress hídrico K_s [0-1] depende do teor de água e da salinidade do solo na zona radicular. Em ambos os casos, cálculo de K_s requer um balanço hídrico do solo diário na zona radicular por forma a determinar o teor de água do solo na zona radicular no fim de cada dia, expresso em termos da depleção da água na zona radicular (D_r). Apenas considerando os efeitos do ‘stresse matricial’, K_s é calculado diariamente como uma função linear da D_r no fim do dia anterior sempre que esta exceda o valor de água facilmente disponível na zona radicular:

$$K_s = \frac{TAW - D_{r,j-1}}{TAW - RAW} = \frac{TAW - D_{r,j-1}}{(1 - p)TAW} \quad \text{se } D_{r,j-1} > RAW \quad (3.10a)$$

$$K_s = 1 \quad \text{se } D_{r,j-1} \leq RAW \quad (3.10b)$$

onde TAW e RAW são, respectivamente, a máxima disponibilidade de água no solo [mm] e a água facilmente disponível no solo [mm] na zona radicular, e p [] é a fracção de depleção da água do solo acima da qual se inicia o stresse e $D_{r,j-1}$ é a D_r no fim do dia anterior (j-1). TAW é calculado como a média ponderada do teor de água do solo à capacidade de campo (θ_{FC}) e no ponto de emurchecimento (θ_{FC}) nos vários horizontes do solo até à profundidade radicular actual ($Z_{r\ act}$), ou aproximado por valores tabelados para várias classes de textura do solo (Allen et al., 1998; 2005b). Allen et al (1998) também providencia valores ‘padrão’ para a fracção p , assim como procedimentos para ajustar o valor de p à procura climática local. No caso de consociações de culturas a fracção p , aqui designada por p_{inter} , é calculada da seguinte forma:

$$p_{inter} = p_{dom} \quad \text{se } Data_{act} < Data_{plant\ sub} \quad (3.11a)$$

$$p_{inter} = \frac{p_{dom} f_{c\ dom} K_{cb\ dom} + p_{sub} f_{c\ sub} K_{cb\ sub}}{f_{c\ dom} K_{cb\ dom} + f_{c\ sub} K_{cb\ sub}} \quad \text{se } Data_{plant\ sub} \leq Data_{act} \leq Data_{harv\ dom} \quad (3.11b)$$

$$p_{inter} = p_{sub} \quad \text{se } Data_{act} > Data_{harv\ dom} \quad (3.11c)$$

onde p_{dom} e p_{sub} são, respectivamente, os valores de p da cultura dominante e subordinada, $Data_{act}$ é a data actual durante a execução do modelo, e $Data_{plant\ sub}$, e $Data_{harv\ dom}$ são, respectivamente, as datas de plantação e de colheita da cultura subordinada e da cultura dominante. Os valores de K_{cb} são considerados na ponderação para expressar uma possível sensibilidade mais elevada de uma das culturas quanto aos défices hídricos, particularmente durante período médio (*mid-season*). Assim, quando tanto a cultura dominante como a subordinada ocupam uma fracção f_r de solo igual, é dada uma ponderação mais elevada ao valor de p da cultura com maiores necessidades de água, ou seja, com maior valor de K_{cb} .

Quando ambos os potenciais matricial e osmótico limitam a T_c , seguindo a abordagem proposta por Pereira et al. (2007, 2014) para a modelação do balanço hídrico do solo, e já testada por Domínguez et al. (2007, 2014), K_s é calculado por (Allen et al., 1998; Pereira et al., 2014):

$$K_s = \left(\frac{TAW_{salt} - D_{r,i}}{TAW_{salt} - RAW_{salt}} \right) \left(1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_{e\ threshold}) \right) \quad (3.12)$$

onde TAW_{salt} e RAW_{salt} são, respectivamente, a máxima disponibilidade de água no solo e a água facilmente disponível no solo em condições salinas [mm], EC_e é a condutividade eléctrica do extracto de saturação do solo [$dS\ m^{-1}$], $EC_{e\ threshold}$ é o valor específico de EC_e acima do qual a cultura entra em stress devido a sua sensibilidade a salinidade ($dS\ m^{-1}$), b é a percentagem de redução na produção por unidade de aumento de EC_e (% / $dS\ m^{-1}$), e K_y é o factor de resposta da produção à quantidade de água (Stewart et al., 1977; Doorenbos e Kassam, 1979). O primeiro termo do segundo membro da Eq. (3.13) representa o stress matricial quando $D_{r,i} > RAW_{salt}$, e é calculado diariamente através do balanço hídrico na zona radicular; o segundo termo é utilizado para corrigir o anterior de acordo com os efeitos do stresse salino (osmótico), ou seja, quando $EC_e > EC_{e\ threshold}$ relativo à cultura considerada. Nesta abordagem, TAW e RAW são ajustados à salinidade pela correcção do teor de água do solo no ponto de emurchecimento (θ_{WP} , $m^3\ m^{-3}$) e da fracção de depleção p de acordo com as condições efectivas de salinidade e tendo em conta a tolerância específica da cultura àquelas

condições:

$$\theta_{WP\ salt} = \theta_{WP} + \frac{b}{100} \left(\frac{EC_e - EC_{e\ threshold}}{10} \right) (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \quad (3.13)$$

$$p_{salt} = p - b(EC_e - EC_{e\ threshold})p \quad (3.14)$$

onde $\theta_{WP\ salt}$ e p_{salt} são, respectivamente, os valores de θ_{WP} e p corrigidos para condições salinas. Daqui resulta que a máxima disponibilidade de água no solo em condições salinas (TAW_{salt}) diminui com o aumento da salinidade, e que a água facilmente disponível em condições salinas (RAW_{salt}) diminui devido à diminuição tanto de TAW como de p :

$$TAW_{salt} = (\theta_{FC} - \theta_{WP\ salt}) 10 Z_r \quad (3.15)$$

$$RAW_{salt} = p_{salt} TAW \quad (3.16)$$

onde Z_r é a profundidade da zona radicular (m), e θ_{FC} é o teor de água do solo à capacidade de campo ($m^3\ m^{-3}$). θ_{FC} não é afectado pelo stress salino. $EC_{e\ threshold}$ e b encontram-se tabelados e descritos em Ayers e Westcot (1985), Allen et al. (1998) e Hoffman e Shalhevet (2007). No SIMDualKc, o valor de EC_e usado nas equações (3.13) a (3.15) pode ser especificado em diferentes datas ao longo da estação de crescimento, considerando-se que varia linearmente entre duas datas consecutivas.

3.2.5 Balanço hídrico da camada evaporativa do solo para calcular o coeficiente de evaporação do solo

Allen et al. (2005b) propôs extensões ao procedimento de cálculo da evaporação do solo descrito na Seção 2.2.1.2 com o objetivo de melhorar a metodologia dos K_e duais e a precisão da estimação do K_e quando apenas uma fracção da superfície do solo é humedecida pela rega e a cobertura do solo é incompleta. Essas extensões, que foram incorporadas no modelo SIMDualKc, consistem em dividir o K_e em duas componentes, K_{ei} , relativo à fracção exposta do solo humedecida pela rega e pela precipitação (f_{ewi}), e K_{ep} , relativo à fracção exposta do solo humedecida apenas pela precipitação (f_{ewp}). Conforme ilustrado na Fig. 3.7, quando a rega ocorre por gotejamento, por sulcos ou por qualquer método que humedece apenas uma fracção da superfície do solo (Fig. 3.7b), a evaporação proveniente do solo é diferente da que ocorre quando toda a superfície do solo é humedecida, por exemplo pela chuva (Fig. 3.7a). Assim, conforme ilustrado na Fig. 3.7a, $f_{ew} = 1 - f_c$, enquanto na Fig. 3.7b f_{ew} é uma fracção de f_w . A abordagem original proposta em FAO-56, que usa um K_e único (Secção 2.2.1.2), prevê este tipo de comportamento diferenciado do K_e para as duas situações mencionadas atrás, embora com algumas limitações quando f_{ew} (ver Tabela 3.1) é diferente para a precipitação e

para a rega. Assim, se chover num determinado dia, a f_w que é considerada para o cálculo da f_{ew} é $f_w = 1$; se no dia seguinte for aplicada uma rega, f_w , muda automaticamente para a f_w do método de rega, a qual por sua vez faz com que f_{ew} passe a referir-se à rega. Assim, se o método de rega apenas humedece parte da superfície do solo, a restante fracção da superfície do solo que foi humedecida apenas pela precipitação no dia anterior não será considerada no cálculo de f_{ew} e consequentemente no cálculo de K_e , embora contribua efectivamente para a evaporação do solo. Calculando estas duas componentes do K_e de forma separada alcança-se uma maior precisão por via das duas fracções f_{ewp} e f_{ewi} , o que permite considerar a contribuição da E_s a partir da fracção do solo humedecida apenas pela precipitação (K_{ep}), além da E_s proveniente da fracção de solo humedecida pela rega (K_{ei}) (Tabela 3.3). Esta vantagem é particularmente notória no caso de culturas com cobertura parcial e métodos de rega que humedecem apenas uma fracção do solo (Allen et al., 2005b), não havendo vantagens quanto a culturas com cobertura total ou métodos de rega que humedecem totalmente o solo. Assim, o coeficiente de evaporação K_e é calculado como:

$$K_e = K_{ei} + K_{ep} \quad (3.17)$$

sendo a evaporação total a partir da fracção exposta da superfície do solo dada por:

$$E = K_e ET_o = (K_{ei} + K_{ep}) ET_o \quad (3.18)$$

com $K_{ei} \geq 0$ e $K_{ep} \geq 0$.

A Tabela 2 apresenta um resumo das equações necessárias para o cálculo de K_{ei} e K_{ep} e as suas relações com o balanço hídrico na camada superficial do solo para as fracções f_{ewi} e f_{ewp} .

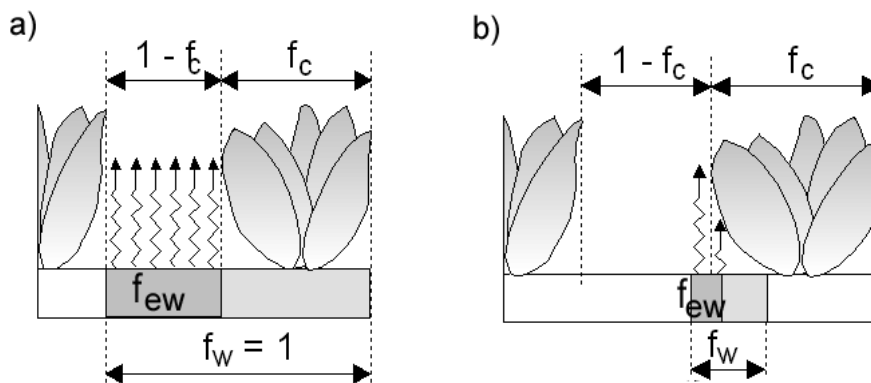


Fig. 3.7. Relação entre as fracções do solo parcialmente coberto pela cultura, f_c , solo humedecido, f_w , e solo humedecido e exposto à radiação, f_{ew} , para as situações em que o solo é humedecido pela precipitação (a), ou pela rega que apenas humedece parte da superfície do solo (b)

Tabela 3.2. Resumo das equações relativas às extensões para o cálculo do coeficiente de evaporação do solo (Allen et al., 2005b)

Solo humedecido pela rega e pela precipitação	Solo humedecido apenas pela precipitação
$K_{ei} = K_{ri} W (K_{c\max} - K_{cb}) \leq f_{ewi} K_{c\max}$	$K_{ep} = K_{rp} (1 - W) (K_{c\max} - K_{cb}) \leq f_{ewp} K_{c\max}$
$W = \frac{1}{1 + \frac{f_{ewp} (TEW - D_{ep})}{f_{ewi} (TEW - D_{ei})}}$	
$f_{ewi} = \min(1 - f_c, f_w)$	$f_{ewp} = 1 - f_c - f_{ewi}$
$K_{ri} = \frac{TEW - D_{ei,j-1}}{TEW - REW}$	$K_{rp} = \frac{TEW - D_{ep,j-1}}{TEW - REW}$
$D_{ei,j} = D_{ei,j-1} - (P_j - RO_j) - \frac{I_j}{f_w} + \frac{E_{i,j}}{f_{ewi}} + T_{ei,j} + DP_{ei,j}$	$D_{ep,j} = D_{ep,j-1} - (P_j - RO_j) + \frac{E_{p,j}}{f_{ewp}} + T_{ep,j} + DP_{ep,j}$
$DP_{ei,j} = (P_j - RO_j) + \frac{I_j}{f_w} - D_{ei,j-1} \geq 0$	$DP_{ep,j} = (P_j - RO_j) - D_{ep,j-1} \geq 0$
$T_{ei} = K_{ti} K_{cb} K_s ET_o$	$T_{ep} = K_{tp} K_{cb} K_s ET_o$
$K_{ti} = \left(\frac{1 - \frac{D_{ei}}{TEW}}{1 - \frac{D_r}{TAW}} \right) \left(\frac{Z_e}{Z_r} \right)^{0.6}$	$K_{tp} = \left(\frac{1 - \frac{D_{ep}}{TEW}}{1 - \frac{D_r}{TAW}} \right) \left(\frac{Z_e}{Z_r} \right)^{0.6}$

Nota 1: Os subscritos j e $j-1$ referem-se, respectivamente, ao final do dia corrente e ao final do dia anterior; f_{ewi} e f_{ewp} são, respectivamente, a fração de solo humedecida tanto pela rega como pela precipitação, e apenas pela precipitação; W é um coeficiente de ponderação para a partição da energia disponível pelas frações f_{ewi} e f_{ewp} ; K_{rp} e K_{ri} são, respectivamente, o coeficiente de redução da evaporação para as frações f_{ewp} e f_{ewi} [mm]; $D_{ep,j}$ e $D_{ei,j}$ são, respectivamente, os valores acumulados da depleção da água na camada superficial do solo no fim do dia j para as frações f_{ewp} e f_{ewi} [mm]; P_j é a precipitação; RO_j é o escoamento superficial; $P_j - RO_j$ é a precipitação efetiva [mm]; I_j é a dotação de rega [mm]; f_w é a fração da superfície do solo humedecida pela rega; E_p e E são, respectivamente, a evaporação do solo a partir das frações f_{ewp} e f_{ewi} [mm]; T_{ep} e T_{ei} são, respectivamente, a quantidade de transpiração extraída das frações f_{ewp} e f_{ewi} [mm]; DP_{ep} e DP_{ei} são, respectivamente, a perda de água por drenagem abaixo da camada evaporativa a partir das frações f_{ewp} e f_{ewi} [mm]; K_{tp} e K_{ti} são, respectivamente, a proporção da ET basal extraída das frações f_{ewp} e f_{ewi} ; Z_e e Z_r são, respectivamente, a profundidade da camada superficial evaporativa e a profundidade efetiva da zona radicular [mm]; TEW é o total de água evaporável [mm]; REW é a água facilmente evaporável; e TAW é o total de água disponível [mm].

Nota 2: quando o solo é coberto por um *mulch* plástico, f_c é estimado como $f_c = \max(f_c, f_{r\ mulch})$, onde $f_{r\ mulch}$ é a fração de solo coberto pelo *mulch* plástico. Assim, f_{ewp} está limitado a 0.001.

3.2.6. Balanço hídrico do solo na zona radicular das culturas

O balanço hídrico do solo na zona radicular, expresso em termos da depleção de água no final do dia, é calculado usando o tradicional modelo de camada única (Allen et al., 1998, 2007b):

$$D_{r,j} = D_{r,j-1} + (Z_{r,j} - Z_{r,j-1})(D_{r \text{ inf mm/m}, j-1}) - P_j - RO_j - I_j - CR_j + ET_{c,j} + DP_j \quad (3.19)$$

onde $D_{r,j}$ é a depleção de água na zona radicular no final do dia j [mm]; $D_{r,j-1}$ é a depleção de água na zona radicular no final do dia anterior, $j-1$ [mm]; $Z_{r,j}$ é a profundidade radicular no final do dia j ; $Z_{r,j-1}$ é a profundidade radicular no final do dia anterior, $j-1$; $D_{r \text{ inf mm/m}, j-1}$ é a depleção de água no solo expressa em mm m^{-1} entre $Z_{r,j}$ e a profundidade radicular máxima ($Z_{r \text{ máx}}$) no final do dia anterior, $j-1$; P_j é a precipitação no dia j [mm]; RO_j é o escoamento superficial da água não infiltrada no solo no dia j [mm]; I_j é a dotação líquida de rega no dia j [mm]; CR_j é a ascensão capilar a partir da toalha freática no dia j [mm]; $ET_{c,j}$ é a ET da cultura no dia j [mm]; e DP_j é a água que sai da zona radicular por drenagem no dia j [mm].

O termo $(Z_{r,j} - Z_{r,j-1})(D_{r \text{ inf mm/m}, j-1})$ contabiliza a contribuição do aprofundamento radicular entre os dias $j-1$ e j para a disponibilidade de água para as plantas, que é tanto mais reduzida quanto maior for a depleção da camada de solo entre $Z_{r,j-1}$ e $Z_{r,j}$, e tanto maior quanto menor for a depleção nessa camada, procedimento que também é adoptado no modelo PILOTE (Khaledian et al., 2009). Atente-se no entanto que $D_{r \text{ inf mm/m}, j-1}$ é a depleção média (mm m^{-1}) entre $Z_{r,j-1}$ e $Z_{r \text{ máx}}$, e que portanto $(Z_{r,j} - Z_{r,j-1})(D_{r \text{ inf mm/m}, j-1})$ é apenas uma aproximação relativamente grosseira do valor de D_r entre $Z_{r,j-1}$ e $Z_{r,j}$. Na Tabela 3.4 apresenta-se o esquema de cálculo de $D_{r \text{ inf mm/m}, j-1}$, mostrando o comportamento dinâmico desta variável, em função da entrada de água por percolação a partir da zona radicular acima ($DP_{\text{sup},j}$) e da perda de água por percolação abaixo de $Z_{r \text{ máx}}$ ($DP_{\text{inf},j}$).

Tabela 3.3. Cálculo da depleção de água na camada de solo entre $Z_{r,i}$ e $Z_{r,máx}$, em valor absoluto, $D_{r,inf}$ [mm], e relativo, $D_{r,inf\ mm/m}$ [mm m⁻¹].

Cálculo de $D_{r,inf\ mm/m}$ no início do primeiro dia dos cálculos ($j = 0$)

$$D_{r,inf,0} = \frac{TAW_{Z_{r,máx}}}{Z_{r,máx}} (Z_{r,máx} - Z_{r,0}) \%D_{r,inf}$$

$$D_{r,inf\ mm/m,0} = \frac{D_{r,inf,0}}{Z_{r,máx} - Z_{r,0}}$$

Cálculo de $D_{r,inf\ mm/m}$ desde o fim do dia 1 até ao dia em que $Z_{r,j} = Z_{r,máx}$

$$D_{r,inf,j} = D_{r,inf\ mm/m,j-1} (Z_{r,máx} - Z_{r,j}) + DP_{sup,j} - DP_{inf,j}$$

$$D_{r,inf\ mm/m,j} = \frac{D_{r,inf,j}}{Z_{r,máx} - Z_{r,j}}$$

Nota: $Z_{r,máx}$ é a profundidade radicular máxima; $Z_{r,0}$ é a profundidade radicular no início dos cálculos ($j = 0$); $Z_{r,j}$ é a profundidade radicular no final do dia j ; $TAW_{Z_{r,máx}}$ é a disponibilidade máxima de água no solo até $Z_{r,máx}$; $\%D_{r,inf}$ é a percentagem inicial da depleção de água entre $Z_{r,máx}$ e $Z_{r,0}$; $D_{r,inf,0}$ [mm] e $D_{r,inf,j}$ [mm], são, respectivamente, a depleção de água entre $Z_{r,máx}$ e $Z_{r,0}$ em valor absoluto em $j = 0$ e no final do dia j ; $D_{r,inf\ mm/m,0}$ [mm m⁻¹], $D_{r,inf\ mm/m,j-1}$ [mm m⁻¹] e $D_{r,inf\ mm/m,j}$ [mm m⁻¹], são respectivamente, a depleção de água entre $Z_{r,máx}$ e $Z_{r,0}$ em valor relativo à data do início dos cálculos ($j = 0$), no final dia anterior ($j-1$) e no final dia (j); $DP_{sup,j}$ e $DP_{inf,j}$ são, respectivamente, a entrada de água no reservatório de solo entre $Z_{r,máx}$ e $Z_{r,j}$ por drenagem abaixo de $Z_{r,j}$ e a saída de água por drenagem abaixo de $Z_{r,máx}$.

Faz-se notar que no caso de existir uma toalha freática superficial e os valores de Z_r especificados pelo utilizador e posteriormente interpolados ultrapassarem a profundidade da toalha freática (D_{WT}), o modelo altera automaticamente os valores de Z_r para $Z_r = D_{WT}$; assim, $D_{r,inf\ mm/m,j-1}$ passa a referir-se à depleção da água do solo abaixo do nível freático que nunca é alcançado pelas raízes, pelo que nestas condições o termo $(Z_{r,j} - Z_{r,j-1}) (D_{r,inf\ mm/m,j-1})$ não é utilizado na Eq. 3.20.

Para inicializar o balanço hídrico do solo é necessário especificar a percentagem inicial da depleção de água na zona radicular (entre 0 e $Z_{r,0}$) e na camada de solo abaixo da zona radicular (entre $Z_{r,0}$ e $Z_{r,máx}$).

O SIMDualKc estima não só a água disponível no solo (ASW) na zona radicular no final do dia j ($ASW_{Z_{r,j}}$), calculada como $ASW_{Z_{r,j}} = TAW_{Z_{r,j}} - D_{r,j}$, como a ASW até $Z_{r,máx}$ ($ASW_{Z_{r,máx}}$), calculada como $ASW_{Z_{r,máx}} = ASW_{Z_{r,j}} + (TAW_{inf,j} - D_{r,inf,j})$. Isto é importante por exemplo para efeitos da verificação do fecho da equação do balanço hídrico, o qual não é possível se este for calculado apenas para $Z_{r,j}$.

A dotação líquida de rega no dia j (I_j) é determinada de acordo com as instruções dadas pelo utilizador: 1) pode ser especificada directamente pelo utilizador, por exemplo, caso se pretenda avaliar um determinado calendário de rega, em que os valores de I_j são aqueles determinados experimentalmente na parcela; ou 2) I_j é calculada pelo modelo, em função da estratégia pretendida para a programação da rega (plena satisfação das necessidades hídricas, rega deficitária, dotações de rega fixas ou variáveis dependendo da ASW que se pretende atingir com a rega) e de restrições hídricas, sendo estes aspectos discutidos de forma mais pormenorizada na Secção 3.3.1.

Os fluxos de ascensão capilar (CR) e de percolação profunda (DP) correspondem, respectivamente, ao fluxo ascendente de água proveniente de uma toalha freática pouco profunda para a zona radicular, e ao fluxo descendente do excesso de água infiltrada para fora da zona radicular, que pode recarregar a toalha freática. As componentes CR e DP são estimados pelo modelo SIMDualKc através de dois métodos alternativos:

(i) Usando uma abordagem mais simplificada, descrita em Doorenbos e Pruitt (1977), que assume que num dia em que $P_j - RO_j$ exceda $ET_{c,j} + D_{r,j-1}$, esse excesso, i.e., DP_j ocorre por inteiro nesse mesmo dia, o que pressupõe uma drenagem instantânea de toda a água acima de TAW, voltando $D_{r,j} = 0$ no fim desse dia. O valor de CR é estimado usando valores pré-determinados para a ascensão capilar potencial ($CR_{máx}$), dependentes do tipo de solo, que são depois ajustados de acordo com o rácio entre a ASW e a RAW. Pode adoptar-se um valor constante de $CR_{máx}$ ou especificarem-se valores variáveis de $CR_{máx}$ em certas datas durante o período de crescimento. Considera-se que CR_{act} é nula enquanto $D_{r,j} \leq RAW$, aumentando progressivamente à medida que $D_{r,j}$ ultrapassa RAW, tal como: $CR_{act} = CR_{máx} - CR_{máx} (D_{r,j}/RAW)$.

(ii) Usando as equações paramétricas propostas por Liu et al. (2006). Esta opção exige a selecção e a calibração de parâmetros relativos ao armazenamento de água do solo e à profundidade da toalha freática (Tabela 3.4), bem como a especificação dos valores do índice de área foliar (LAI) e da D_{WT} ao longo do período de desenvolvimento da cultura. O cálculo de DP envolve igualmente a selecção e calibração de parâmetros relacionados com a água do solo e com a velocidade de drenagem (Tabela 3.4).

As equações paramétricas para o cálculo da CR_{act} e da DP propostas por Liu et al. (2006) encontram-se resumidas na Tabela 3.4. CR_{act} depende da D_{WT} , do armazenamento actual, ‘uniforme’ e ‘crítico’ de água no solo, respectivamente, W_a , W_s e W_c , da evapotranspiração máxima ou potencial (ET_m) e dos valores calculados para a ascensão capilar potencial ($CR_{máx}$).

Os parâmetros a_1 , b_1 , a_2 , b_2 , a_3 , b_3 , a_4 e b_4 são empíricos e variam de acordo com o tipo de solo (Tabela 3.5). Os armazenamentos ‘uniforme’ e ‘crítico’ de água do solo (W_s e W_c) são calculados em função da profundidade da toalha freática (D_{WT}) e da evapotranspiração máxima (ET_m). A DP é calculada como a diferença entre os valores do armazenamento de água do solo acima da capacidade de campo em dois dias consecutivos ($W_{j+1} - W_j$) consecutivos, calculados com uma função potência decrescente. Os parâmetros a e b dependem das características do solo. Uma descrição mais detalhada destes procedimentos de cálculo pode ser consultada em Liu et al. (2006).

Tabela 3.4. Resumo das equações usadas para calcular a ascensão capilar (CR) e a percolação profunda (DP) (Liu et al. 2006).

Equações	Condições	Parâmetros
Ascensão Capilar		
$W_c = a_1 D_w^{b_1}$ (mm)		$a_1 = W_{FC}$, armazenamento de água no solo à capacidade de campo (mm) para a profundidade radicular máxima (Z_r); $a_1 = \theta_{FC} Z_r / 1000$ $b_1 = -0.17$
$W_s = a_2 D_w^{b_2}$ (mm)	$D_w \leq 3$ m	$a_2 = 1.1 [(\theta_{FC} + \theta_{WP})/2] Z_r / 1000$, i.e. o armazenamento de água no solo acima da média entre a capacidade de campo e o coeficiente de emurchecimento (mm) $b_2 = -0.27$
$W_s = 240$ mm	$D_w > 3$ m	
$D_{wc} = a_3 ET_m + b_3$ (m)	$ET_m \leq 4$ mm d ⁻¹	$a_3 = -1.3$
$D_{wc} = 1.4$ (m)	$ET_m > 4$ mm d ⁻¹	$b_3 = 6.7$ para solos argilosos e franco-argilo-limosos, diminuindo para 6.2 para solos areno-francos
$CR_{max} = k \cdot ET_m$ (mm d ⁻¹)	$D_w \leq D_{wc}$	$a_4 = 4.6$ para solos franco-limosos e franco-argilo-limosos, diminuindo para 3 em solos areno-franco;
$CR_{max} = a_4 D_w^{b_4}$ (mm d ⁻¹)	$D_w > D_{wc}$	$b_4 = -0.65$ para solos franco-limosos, diminuindo para -2.5 para solos areno-francos
$k = 1 - e^{-0.6 \cdot LAI}$	$ET_m \leq 4$ mm d ⁻¹	
$k = 3.8/ET_m$	$ET_m > 4$ mm d ⁻¹	
$CR = CR_{max}(D_w, ET_m)$ (mm d ⁻¹)	$W_a < W_s(D_w)$	
$CR = CR_{max}(D_w, ET_m) \left(\frac{W_c(D_w) - W_a}{W_c(D_w) - W_s(D_w)} \right)$ (mm d ⁻¹)	$W_s(D_w) \leq W_a \leq W_c(D_w)$	
$CR = 0$	$W_a < W_c(D_w)$	
Percolação profunda		
$W_{i+1} = a \left[1 + \left(\frac{W_i}{a} \right)^{\frac{1}{b}} \right]^b$	$W_a > W_{FC}$	a – valor do armazenamento de água no solo entre θ_{FC} (W_{FC}) e θ_s (W_s), ex. $[(W_s + W_{FC})/2] Z_r / 1000$ (mm); $b < -0.0173$ para solos de drenagem rápida, caso contrário $b > -0.0173$

Nota: W_a = armazenamento actual de água na zona radicular (mm); W_c = armazenamento crítico (mm); W_s = armazenamento uniforme (mm); θ_{FC} = teor de água do solo à capacidade de campo (adimensional); θ_{WP} = teor de água do solo no ponto de emurchecimento (adimensional); D_{wt} = profundidade da toalha freática (m); D_{wc} = profundidade crítica da toalha freática (m); ET_m = taxa de evapotranspiração potencial (mm d⁻¹), habitualmente $ET_m = ET_c$ (mm d⁻¹); CR_{max} = fluxo potencial de ascensão capilar (mm d⁻¹); CR = fluxo actual de ascensão capilar (mm d⁻¹); k = fator que relaciona a evapotranspiração com a transpiração (adimensional); LAI = índice de área foliar (adimensional); W_j e W_{j+1} = armazenamento de água no solo acima da capacidade de campo, respectivamente, no dia j e no dia $j+1$, após uma rega ou precipitação ter provocado uma subida do armazenamento de água superior à capacidade de campo.

Tabela 3.5. Parâmetros das equações paramétricas da ascensão capilar para três tipos diferentes de solo, relativamente a uma profundidade de raízes de 1.0 metros (Liu et al., 2006).

Parâmetros do solo			
	Franco-limoso	Franco-arenoso	Franco-argiloso
a_1	385.0	320	407.1
b_1	-0.17	-0.16	-0.32
a_2	320.0	303.2	289.3
b_2	-0.27	-0.54	-0.16
a_3	-1.3	-0.15	-1.4
b_3	6.6	2.1	6.8
a_4	4.60	7.55	1.11
b_4	-0.65	-2.03	-0.98

Faz-se notar, no entanto, que as equações para o cálculo da CR apresentadas na Tabela 3.4 foram derivadas assumindo uma profundidade radicular (Z_r) de 1.0 m (Liu et al., 2006), pelo que estas equações não funcionarão correctamente se Z_r for diferente de 1.0 m. Assim, se $Z_r \neq 1.0$ m, o procedimento adoptado no SIMDualKc para ultrapassar esta limitação resume-se aos seguintes passos:

- Multiplicação dos parâmetros a_1 e a_2 , correspondentes ao armazenamento de água no solo até 1.0 m de profundidade (mm), respectivamente, à capacidade de campo e acima da média entre θ_{FC} e θ_{WP} , pelo valor actual da Z_r ($Z_{r \text{ act}}$);
- Multiplicação do valor de W_s para $D_{WT} > 3.0$ m, i.e., $W_s = 240$ mm (Tabela 3.4), por $Z_{r \text{ act}}$;
- Alteração do valor de D_{wc} para $ET_m > 4.0$ mm d⁻¹, i.e., $D_{wc} = 1.4$ m (Tabela 3.4), que passa a ser calculado como: $D_{wc} = 1.4 + (Z_{r \text{ act}} - 1)$;
- Utilização não dos valores medidos da D_{WT} mas antes de valores artificiais da D_{WT} ($D_{WT Z_{r \text{ act}}}$), calculados da seguinte forma: $D_{WT Z_{r \text{ act}}} = 1 + (D_{WT} - Z_{r \text{ act}})$. Assim, se por exemplo, $Z_{r \text{ act}} = 0.5$ m e $D_{WT} = 1.5$ m, resultará $D_{WT Z_{r \text{ act}}} = 2.0$ m, ou no extremo oposto, se $Z_{r \text{ act}} = 1.3$ m e $D_{WT} = 1.5$ m, então $D_{WT Z_{r \text{ act}}} = 1.2$ m.

As perdas de água por escoamento superficial aquando da ocorrência de chuvadas intensas são influenciadas por diversos factores, como o tipo de cobertura vegetal do solo, o declive do terreno, a textura e a estrutura do solo, a permeabilidade e a formação de ‘crostas’ à superfície do solo, condições prévias do teor de água no solo, práticas de preparação do solo, duração e intensidade da precipitação. A quantificação destes parâmetros para as condições específicas

de uma dada parcela, é uma tarefa difícil, especialmente quanto àqueles parâmetros que apresentam um carácter mais dinâmico.

O método do número de curva (CN) é um modelo empírico simples para estimar o volume de escoamento superficial gerado por grandes quantidades de precipitação aquando da ocorrência de tempestades, tendo sido desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (USDA-SCS, 1972). Este modelo tem apenas dois parâmetros – o número de curva CN e a depleção da água do solo previamente à chuvada. Tendo em conta que este procedimento foi pensado para o uso em bacias hidrográficas, CN está relacionado com o tipo de solo, o tipo de vegetação, e as condições antecedentes de humidade do solo, podendo ser estimado usando valores tabelados, por exemplo, em Allen et al. (2007b). Este método é usado há muito para estimar a precipitação efectiva e o escoamento directo em estudos do balanço hídrico do solo (Dastane, 1974; Martin e Gilley, 1993; Allen et al., 2007b), sendo comum a sua adopção em modelos de balanço hídrico do solo (Raes et al., 2006; 2009, Mandal et al., 2007, Nishat et al., 2007 e Luo et al., 2008).

O número de curva (CN) é adimensional e varia entre 0 (ausência de escoamento) e 100 (toda a precipitação é escoada), sendo geralmente o valor de CN seleccionado a partir de tabelas padrão com base na cultura e no tipo de solo, e depois ajustado ao teor de água no solo antecedente à chuvada (USDA-SCS, 1972). No modelo SIMDualKc, o valor de CN é ajustado diariamente por forma a que reflita o impacto da variação do teor de água no solo nas propriedades de infiltração deste. Na Tabela 3.6 apresentam-se as equações que relacionam os valores de CN com a depleção de água do solo na camada superficial (D_e). Consoante a correspondência entre o valor actual de D_e e os seus homólogos relativos a condições antecedentes secas (D_e -AWC I) e húmidas (D_e -AWC III) da água no solo, é calculado um valor diferente de CN. A descrição deste tema na rega é apresentada por Allen et al. (2007b).

Tabela 3.6. Resumo das equações usadas para ajustar o número de curva (CN) às condições hídricas do solo antecedentes, AWC_{II} (Allen et al., 2007b).

$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.281 - 0.01281 \cdot CN_{II}}$	
$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.427 + 0.00573 \cdot CN_{II}}$	
CN_{II} – Valores tabelados de CN para a condição ASW II	
$D_{e-AWC\ III} = 0.5 \cdot REW$	
$D_{e-AWC\ I} = 0.7 \cdot REW + 0.3 \cdot TEW$	
$CN = CN_{III}$	Condições:
$CN = CN_I$	$D_e \leq D_{e-AWC\ III}$
$CN = \frac{(D_e - 0.5 \cdot REW) \cdot CN_I + (0.7 \cdot REW + 0.3 \cdot TEW - D_e) \cdot CN_{III}}{0.2 \cdot REW + 0.3 \cdot TEW}$	$D_e \geq D_{e-AWC\ I}$
	$D_{e-AWC\ III} < D_e < D_{e-AWC\ I}$

Nota: CN_I , CN_{II} e CN_{III} são, respectivamente, os números de curva associados às condições de humidade do solo antecedentes AWC_I (seco), AWC_{II} (médio) e AWC_{III} (húmido) [0 - 100], $D_{e-AWC\ I}$, $D_{e-AWC\ II}$ e $D_{e-AWC\ III}$ são, respectivamente, a depleção da camada evaporativa do solo nas condições AWC_I , AWC_{II} e AWC_{III} [mm], TEW é o total de água evaporável [mm] e REW é a água facilmente evaporável [mm].

3.3. Descrição do modelo

3.3.1 Características gerais

O modelo SIMDualKc foi desenvolvido seguindo um esquema com três pilares (Figura 3.8): uma interface gráfica, um modelo matemático, e uma base de dados (BD). A BD guarda e retorna informação sobre o clima, propriedades hidráulicas do solo, características da cultura, coberturas vegetais do solo activas e inertes (*mulches*), consociações de culturas, parâmetros da ascensão capilar e da percolação profunda, escoamento superficial, programação da rega, características dos sistemas de rega e dados da simulação, estes últimos combinando a informação anterior por forma a simular as condições específicas da parcela em estudo. A interface foi estruturada por forma a ser visualmente simples e clara, e de operação fácil e intuitiva, fazendo um uso substancial de intervalos recomendados para os parâmetros.

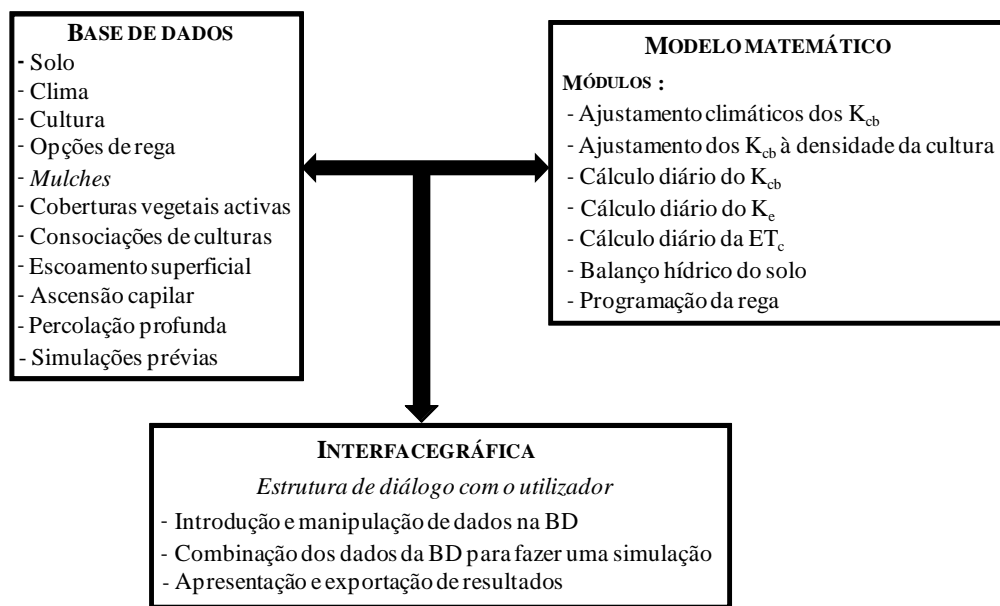


Fig. 3.8. Estrutura conceptual do modelo SIMDualKc.

O SIMDualKc foi desenvolvido em linguagem *Visual Basic 6.0*, que sendo uma linguagem já com algum desuso, foi capaz de disponibilizar todos os objectos de apoio à programação (formulários, tabelas, gráficos, listas de dados, caixas de texto, acesso a bases de dados, etc.) necessários ao desenvolvimento deste modelo interactivo. Embora não seguindo o paradigma da programação orientada a objectos, a abordagem seguida procurou reduzir a complexidade estrutural do código, fazendo uso intensivo de procedimentos (sub-rotinas) e funções de cálculo organizados em diferentes módulos. Esta estrutura relativamente organizada permite uma mais fácil migração do actual código para versões mais actualizadas das linguagens de programação da *Microsoft* (*VB*, *C++* ou *C#*) ou para qualquer linguagem compatível com a plataforma *Microsoft.NET*, por forma a resolver problemas de incompatibilidade com as versões do *Windows* em constante actualização. Para além disso facilita o estabelecimento de ligações a outros tipos de BDs relacionais, nomeadamente BDs georreferenciadas, possibilitando assim, e com recurso às capacidades dos SIG, a estimação da ET_c ao nível do projecto de rega, tal como descrito no Capítulo 7. Esta estrutura do código também já possibilitou que uma versão mais simplificada do modelo fizesse parte de um serviço Web disponibilizado pela EDIA para apoiar os agricultores na tomada de decisão quanto à programação da rega.. Na Fig. 3.9 apresenta-se um esquema detalhado da estrutura do modelo SIMDualKc. O esquema mostra explicitamente os diferentes tipos de dados armazenados na BD, as suas ligações e relações com as rotinas do modelo matemático, e os tipos de resultados que podem ser obtidos.

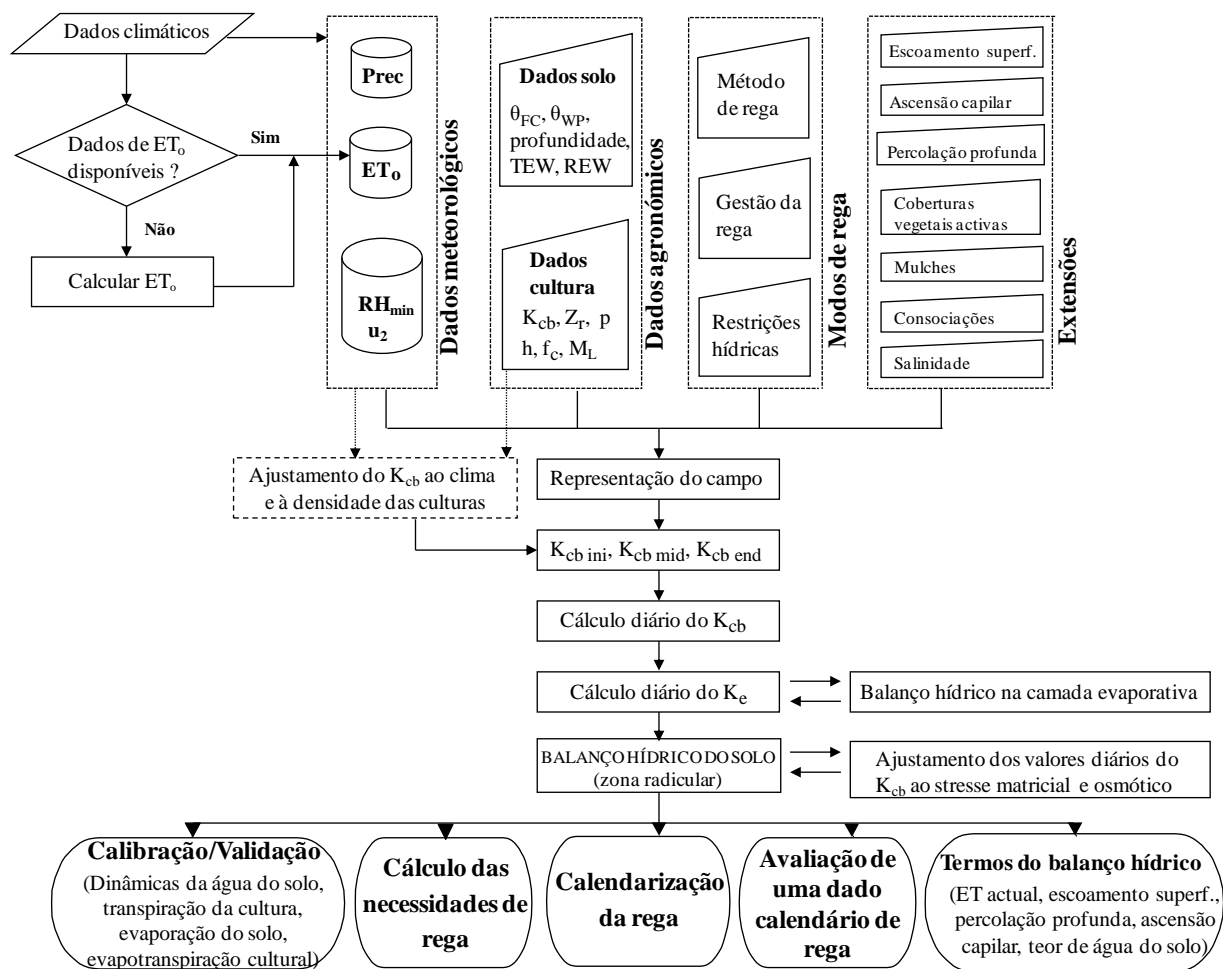


Fig. 3.9. Fluxograma do modelo SIMDualKc.

3.3.2 Estrutura computacional

O procedimento seguido pelo modelo SIMDualKc para implementar o cálculo da ET_c através da abordagem dos K_c duais e para simular diariamente o balanço hídrico do solo por forma a produzir um calendário de rega consiste em (Fig. 3.10):

- (1) Criação de um cenário de produção agrícola através da combinação dos dados inseridos na BD: solo, clima, cultura, sistema de rega, gestão da rega, ascensão capilar, percolação profunda, escoamento superficial, coberturas vegetais activas, coberturas inertes (*mulches*) do solo, consociações de culturas e salinidade do solo.
- (2) Estabelecimento das condições iniciais (dia $j = 0$) da depleção de água na zona radicular ($D_{r,0}$) e nas fracções f_{ewi} ($D_{ei,0}$) e f_{ewp} ($D_{ep,0}$) da camada evaporativa do solo

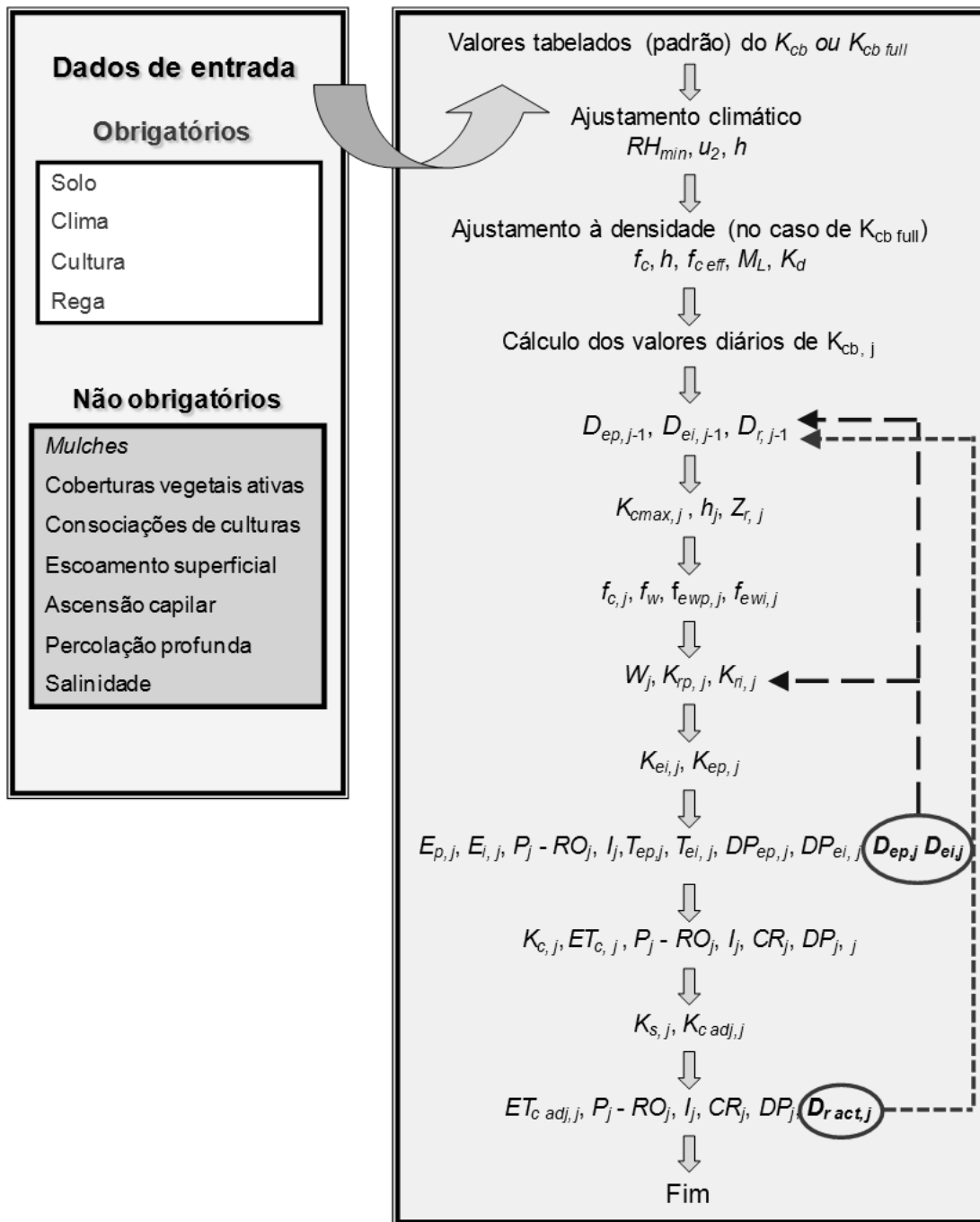


Fig. 3.10. Algoritmo central do modelo SIMDualKc

(3) Ajustamento climático (Eq. 3.2) dos valores especificados de (em modo alternativo):

- $K_{cb\ mid}$, $K_{cb\ end}$ (se $K_{cb\ end} > 0.45$) e $K_{cb\ ini}$ (no caso de culturas de folha persistente) em sistema de monocultura;
- $K_{cb\ full\ ini}$, $K_{cb\ full\ mid}$ e $K_{cb\ full\ end}$ em sistema de monocultura, caso se tenha optado por estimar os valores de K_{cb} a partir de $K_{cb\ full}$, f_c e altura (h) da cultura;
- $K_{cb\ mid}$, $K_{cb\ end}$ (se $K_{cb\ end} > 0.45$) e $K_{cb\ ini}$ (no caso de culturas de folha persistente) para a cultura dominante e para a cultura subordinada no caso de consociações de culturas.

(4) Ajustamento dos valores especificados de $K_{cb\ full}$ às condições actuais de densidade da cultura por via da Eq. 3.4 ou da Eq. 3.5, respectivamente, para o caso da presença ou ausência de uma CVA nas entrelinhas da cultura (Fig. 3.3).

(5) Construção da curva do K_{cb} , i.e., cálculo dos valores diários de K_{cb} para os seguintes casos (em modo alternativo):

- Monocultura (interpolação dos valores de $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$ e $K_{cb\ end}$ directamente especificados ou calculados como na alínea (4) através da Eq. 3.4);
- monocultura com CVA (interpolação dos valores de K_{cb} calculados como na alínea (4) através da Eq. 3.5);
- consociação de culturas (Eq. 3.6).

(6) Cálculo dos valores diários de $K_{ei, j}$ e $K_{ep, j}$ (em que o subscrito j se refere ao dia corrente) de acordo com um procedimento iterativo:

- Utilização dos valores iniciais de D_{ei} e D_{ep} ($D_{ei, 0}$ e $D_{ep, 0}$), caso se trate do primeiro dia dos cálculos ($j = 1$), ou dos valores de D_{ei} e D_{ep} no fim do dia anterior ($D_{ei, j-1}$ e $D_{ep, j-1}$), caso $j > 1$, para calcular o coeficiente de ponderação (W_j) e os coeficientes de redução da evaporação para as fracções f_{ewi} ($K_{ri, j}$) e f_{ewp} ($K_{rp, j}$) (Tabela 3.2);
- Cálculo de $K_{ei, j}$ e $K_{ep, j}$ a partir dos valores de W_j , $K_{ri, j}$ e $K_{rp, j}$, calculados como descrito atrás, e dos parâmetros $K_{c\ max, j}$, $K_{cb, j}$, $f_{ewi, j}$ e $f_{ewp, j}$ (Tabela 3.2)
- Cálculo das depleções D_{ei} e D_{ep} no final do dia j ($D_{ei, j}$ e $D_{ep, j}$) através do balanço hídrico do solo nas respectivas fracções f_{ewi} e f_{ewp} da camada evaporativa:

Entradas:

- na fracção f_{ewi} : dotação de rega (I_j) (Secção 3.2.6) e precipitação (P_j)
- na fracção f_{ewp} : precipitação (P_j)

Saídas:

- na fracção f_{ewi} : evaporação do solo ($E_{i, j} = K_{ei, j} ET_o$), percolação profunda ($DP_{ei, j}$), extracção radicular ($T_{ei, j}$) (Tabela 3.2) e escoamento superficial (RO_j) (Secção 3.2.6);
- na fracção f_{ewp} : evaporação do solo ($E_{p, j} = K_{ep, j} ET_o$), percolação profunda ($DP_{ep, j}$), extracção radicular ($T_{ep, j}$) (Tabela 3.2) e escoamento superficial (RO_j) (Secção 3.2.6);

(7) Cálculo dos valores diários de $K_{c\ act, j}$, $ET_{c\ act, j}$ (em que o subscrito j se refere ao dia corrente) e da depleção de água na zona radicular no fim do dia j ($D_{r, j}$):

- Utilização do valor inicial de D_r ($D_{r,0}$), caso se trate do primeiro dia dos cálculos ($j = 1$), ou do valor de D_r no final do dia anterior ($D_{r,j-1}$), caso $j > 1$, para calcular o coeficiente de stresse ($K_{s,j}$), quer apenas stresse matricial (Eq. 3.10) ou também salino (Eq. 3.12);
- Cálculo do K_c ajustado ao stresse matricial e/ou osmótico: $K_{c,act,j} = K_{s,j} K_{cb,j} + K_{e,j}$, onde $K_{e,j} = K_{ei,j} + K_{ep,j}$
- Cálculo da evapotranspiração cultural actual: $ET_{c,act,j} = K_{c,act,j} ET_{o,j}$
- Cálculo de D_r , no final do dia j ($D_{r,j}$) através do balanço hídrico do solo na zona radicular:

Entradas

- dotação de rega (I_j) (Secção 3.2.6)
- precipitação (P_j)
- ascensão capilar (CR_j) (Secção 3.2.6)

Saídas

- $ET_{c,act,j}$
- percolação profunda (DP_j) (Secção 3.2.6)
- escoamento superficial (RO_j) (Secção 3.2.6)

3.3.3. Abordagem seguida para a simulação de práticas de gestão das culturas e da rega com impacto em K_{cb} , K_e e no balanço hídrico

3.3.3.1 Opções de rega

O tipo de sistema de rega influencia a ET_c através da fracção da superfície do solo humedecida pela rega (f_w), da frequência de rega e da quantidade de água aplicada em cada evento. Para contabilizar estes efeitos na ET_c , são utilizados no SIMDualKc os seguintes dados:

- (1) um valor de f_w representativo do sistema de rega, que influencia o cálculo das fracções f_{ewi} e f_{ewp} , e consequentemente dos valores de K_{ei} e K_{ep} (Tabela 3.2).
- (2) a máxima dotação de rega aplicável pelo sistema de rega e o valor de MAD (*management allowed depletion*), i.e., o limiar inferior da disponibilidade de água no solo que desencadeia a rega (conforme descrito posteriormente nesta secção), que juntos vão determinar a frequência com que a superfície do solo é humedecida pela rega, e daí os valores de K_e .

Existem outros factores relacionados com o método de rega que têm um impacto sobre a ET_c , nomeadamente em rega por aspersão, devido à evaporação das gotículas aspergidas e da água interceptada pelas copas durante e depois da rega. No entanto, sendo a energia total disponível à superfície dos cobertos vegetais limitada e sendo parte desta consumida pela evaporação daquela água, sobra menos energia para a transpiração da cultura propriamente dita, que vai ser menor comparativamente àquela que se verificaria, por exemplo, com um método de rega por alagamento ou por sulcos, em que a copa permanece seca e não existem gotículas de água no ar. Assim, o limite superior para a ET_c de uma cultura regada por aspersão será aproximadamente igual ao de uma cultura regada ‘à superfície’, estando esse limite implícito no valor de $K_{c\ max}$ (Tabela 3.1). Assim, o modelo SIMDualKc adopta $K_{c\ max} ET_o$ como uma aproximação da máxima quantidade de água transpirada e evaporada durante e após a rega.

O modelo SIMDualKc oferece várias opções para a programação da rega (Fig. 3.11), incluindo: (1) rega para evitar stresses hídricos (orientada à máxima produção), (2) rega deficitária (em que as culturas são deliberadamente sujeitas a um grau de stresse hídrico moderado, conduzindo a uma quebra de produção mas podendo ter impactos positivos na produtividade da água e em aspectos qualitativos da produção), (3) dotações de rega variáveis de acordo com um limiar superior para a água disponível no solo, e (4) sem rega.

Para efeitos de programação da rega o modelo utiliza o conceito de fracção de depleção da água do solo em conforto hídrico ou sem stresse (p), máxima depleção de água permitida por critérios de gestão (MAD) (conceito introduzido por Merriam, 1966), e os conceitos de máxima disponibilidade de água (TAW) e água facilmente disponível (RAW), tal como definidos por Allen et al. (1998, 2005b).

Quando se opta pela ‘rega para evitar stresses hídricos’, o modelo programa uma rega sempre que a depleção da água do solo em determinado dia ultrapasse a máxima depleção de água permitida – MAD (que pode variar consoante o estágio de desenvolvimento da cultura), o que corresponde a escolher a ‘sub-opção’ $MAD \leq p$ (Fig. 3.11). Se a escolha for ‘rega deficitária’, então o stresse hídrico é intencionalmente permitido e a depleção de água do solo pode ultrapassar p , i.e., $MAD > p$. As dotações de rega calculadas pelo modelo podem ser estrangidas por forma a tomarem valores constantes, ou podem ser definidas de acordo com a disponibilidade de água no solo que se pretende atingir depois da rega, definida como uma percentagem de TAW. O modelo permite simular calendários de rega pré-definidos seleccionando a opção ‘dotações e datas de rega fixas’ (Fig. 3.11). Esta opção é vulgarmente utilizada conjuntamente com valores medidos do teor de água do solo para calibrar e validar o

modelo, conforme descrito nos Capítulos 5, 6 e 7 e, por exemplo, em Rosa et al. (2012b). O modelo é capaz de considerar restrições hídricas tanto temporais como em volume, como pode acontecer em regadios colectivos, em que podem ser impostas restrições à frequência de distribuição de água às parcelas (variável com as fases de desenvolvimento das culturas), ou também em regadios colectivos, no caso das parcelas terem reservatórios próprios que são enchidos periodicamente pelo sistema de distribuição de água às parcelas, possuindo assim um volume limitado de água disponível para a rega (Fig. 3.11).

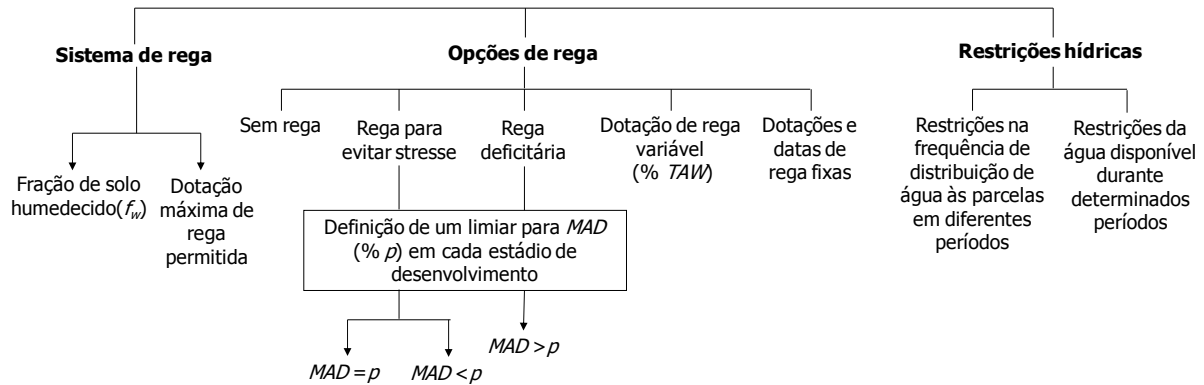


Fig. 3.11. Esquema com as opções de gestão da rega do modelo SIMDualKc.

3.3.3.2 Coberturas vegetais do solo activas

Como referido anteriormente na Secção 3.2.2, é frequente em pomares e vinhas a presença de uma cobertura vegetal activa durante as estações das chuvas, que protege o solo da erosão. Depois da estação das chuvas, o desenvolvimento deste coberto vegetal deverá ser controlado por forma a reduzir a competição pela água, nomeadamente por meio cortes, vários tipos de mobilização do solo ou através da aplicação de herbicidas. A aplicação da Eq. (3.5) não permite simular directamente estas práticas de gestão que afectam o valor do K_{cb} da CVA. No entanto, se aplicarmos o conceito de $K_{cb \text{ full}}$ à CVA ($K_{cb \text{ gcover full}}$), calcularmos o seu valor de acordo com a Fig. 3.12 e utilizarmos-lo na Eq. (3.4) juntamente com o K_d da CVA ($K_{d \text{ gcover}}$) calculado em função da $f_{c \text{ eff}}$ ($f_{c \text{ eff gcover}}$) e da altura (h_{gcover}) desta em datas específicas ao longo o seu ciclo vegetativo, podem estimar-se valores de $K_{cb \text{ cover}}$ reflectindo as condições actuais de densidade da CVA ($K_{cb \text{ cover adj}}$) naquelas datas (Fig. 3.12).

O cálculo de $K_{cb \text{ gcover adj}}$ requer o conhecimento, à data do início da simulação, de h_{gcover} , dos valores da fracção da superfície do solo onde a CVA está presente ($f_{r \text{ gcover}}$) e da sua densidade. Estes valores são então actualizados ao longo do ciclo da cultura, ou alternativamente, imediatamente antes e depois das operação de gestão da CVA (Fig. 3.13). O produto de $f_{r \text{ gcover}}$

pela sua densidade é usado para a calcular a $f_{c\ eff\ gcover}$, que, juntamente com h_{gcover} , é usada no cálculo de $K_{d\ gcover}$ (Fig. 3.12). O modelo calcula então valores diários para $K_{cb\ gcover\ adj}$ utilizando o valor de $K_{cb\ gcover\ full}$ e o valor de $K_{d\ gcover}$ na Eq. 3.4. Os valores diários do K_{cb} conjunto da cultura e da CVA ($K_{cb(crop+gcover)}$) são então calculados utilizando a Eq. 3.5 com o factor de densidade $K_{d\ crop}$ a ser calculado para a cultura e não para a CVA tal como ilustrado na Fig. 3.12.

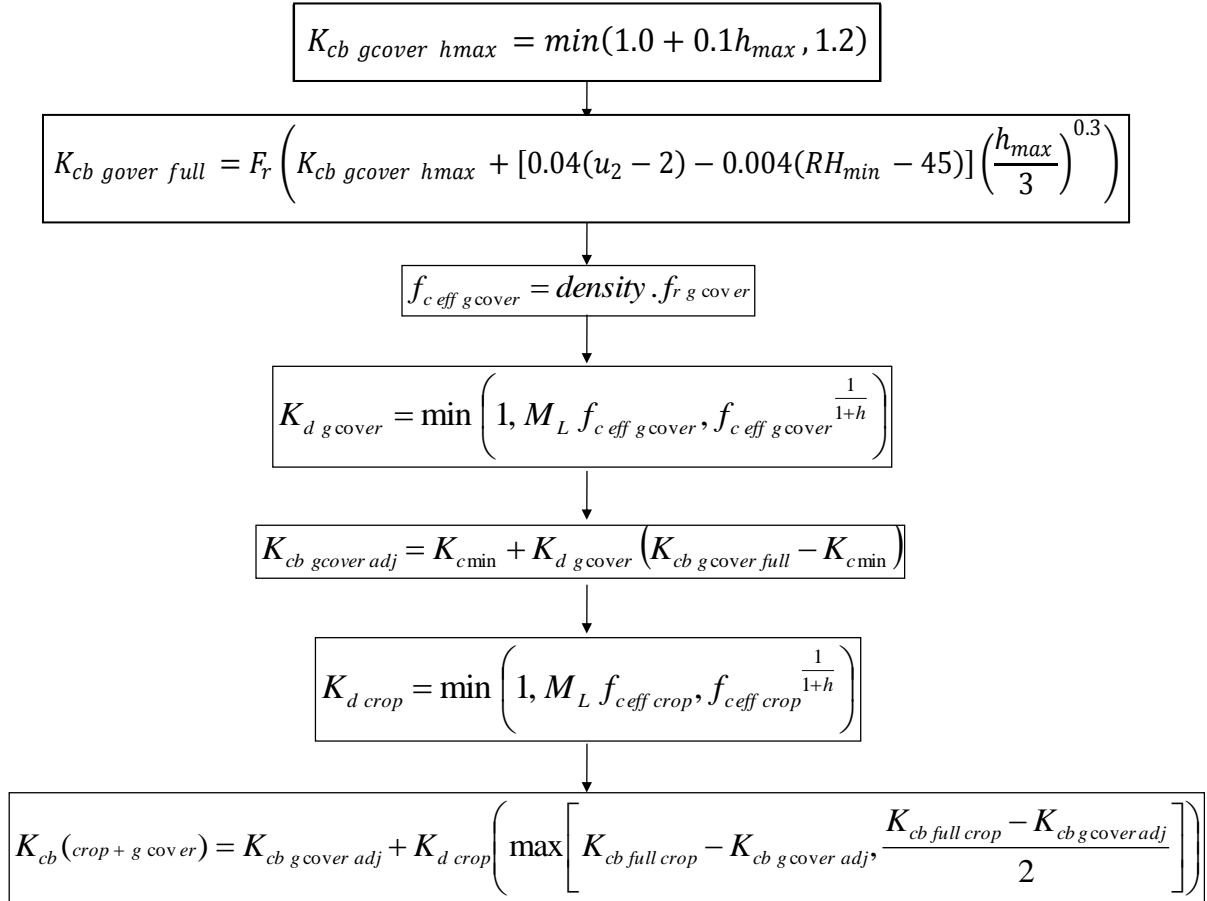


Fig. 3.12. Fluxograma para o cálculo da estimativa de K_{cb} da cobertura ativa do solo a partir da sua densidade, fração de solo coberto e altura, e o cálculo do valor combinado de K_{cb} para a cultura e a cobertura ativa do solo.

O modelo também simula o efeito *mulch* à superfície do solo, quando a CVA se vai dessecando após uma operação de corte, aplicação de herbicidas ou de forma natural, mas mantendo-se na superfície do solo, contribuindo assim para a redução da evaporação do solo. Para contemplar este aspecto, é necessário especificar as data dos cortes e/ou aplicações de herbicida, a fracção de solo que está simultaneamente coberta com o *mulch* e exposta à radiação, e a percentagem estimada de redução da E_s devido ao *mulch* (Fig. 3.13). A redução

na E_s depende essencialmente da densidade do *mulch*, conforme descrito na Secção 3.3.3.3, sendo esta informação também utilizada para ajustar as fracções f_{ewi} e f_{ewp} usadas no cálculo de K_e . O modelo permite que o utilizador vá actualizando esses valores.

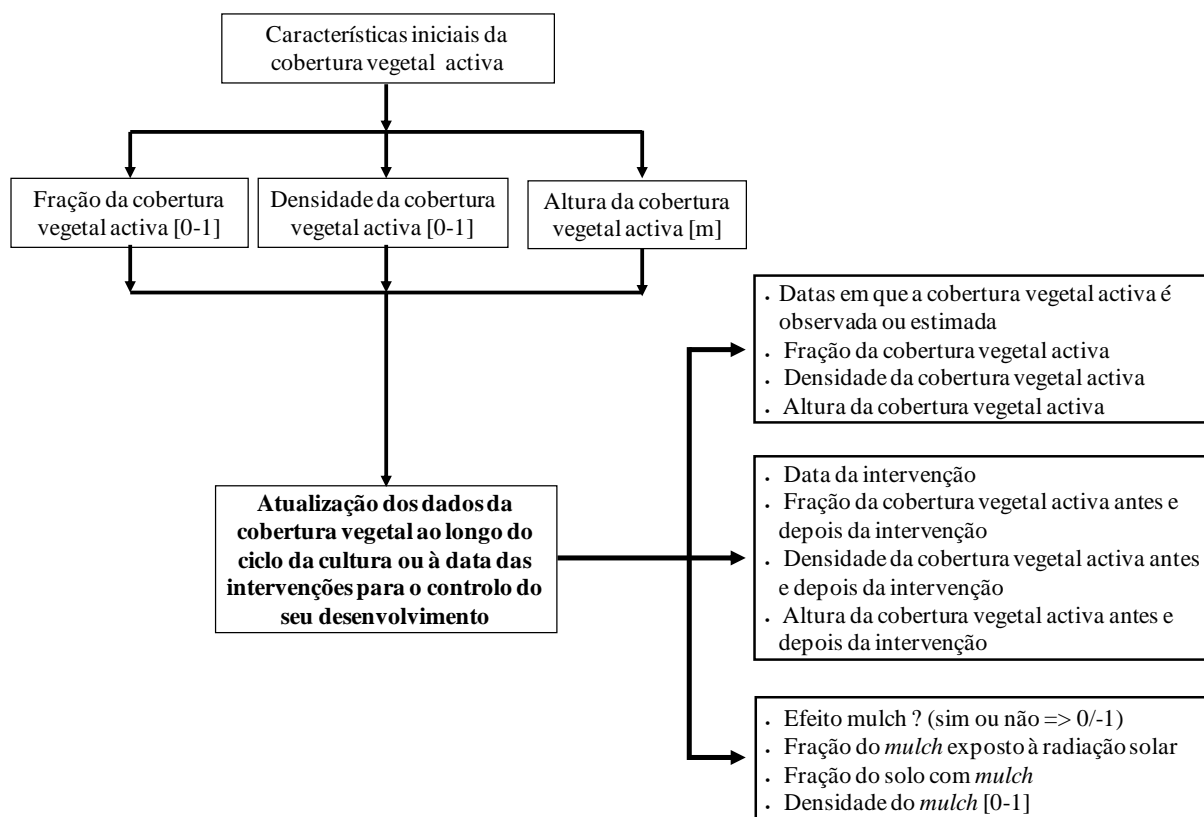


Fig. 3.13. Ajustamento da fracção de solo com cobertura vegetal activa e da sua densidade para os cálculos de K_{cb} e K_e .

3.3.3.3. Cobertura do solo com materiais inertes (*mulches*) para redução da evaporação

Os *mulches* são usados para reduzir as perdas de água por evaporação a partir da superfície do solo, para moderar as flutuações de temperatura na camada superior do solo, para acelerar o desenvolvimento das culturas nas fases iniciais do seu desenvolvimento, para controlar a erosão e fomentar a infiltração, ou para facilitar o controlo de espécies infestantes. Os *mulches* podem consistir em resíduos vegetais originados *in-situ* ou importados para o local, filmes de plástico, ou gravilha e pequenas pedras. Os *mulches* modificam a evaporação do solo pela redução da quantidade de energia disponível à superfície deste, através do aumento do albedo e pelo isolamento da superfície do solo face à radiação e à transferência convectiva por calor sensível. Muitos estudos reportam os efeitos da utilização de *mulches* constituídos por resíduos vegetais, filmes de plástico e pedras na redução da evaporação (Unger e Parker, 1976; Mellouli et al., 200; Huang et al., 2005; Amayreh e Al-Abed, 2005; Dieaz et al., 2005).

Para a modelação da evaporação, estes impactos podem ser contabilizados através da fracção da superfície do solo coberta/sombreada (f_c), que é um dos parâmetros mais importantes para a determinação do K_e pelo método dos K_c duais.

Quando a partição de energia à superfície do solo é modificada devido aos *mulches*, ocorrem fenómenos de advecção localizada que podem promover o aumento da transpiração das culturas, especialmente no caso dos *mulches* de plástico (Lovelli et al., 2005). Por essa razão, Allen et al. (1998, 2007b) propuseram ajustes para o K_{cb} para explicar esses efeitos. Para filmes de plástico, Allen et al. (2007b) propôs o cálculo de K_e para a fracção f_{ewi} , i.e., K_{ei} , assumindo um valor para f_w que estimou ser 2 a 5 vezes maior do que a área dos orifícios donde emergem as plantas para contabilizar a transferência de vapor de água sob o filme de plástico. Se o filme não cobre completamente a superfície do solo, a fracção do solo localizada entre os filmes plásticos que se encontra exposta à radiação solar e humedecida pela precipitação e (f_{ewp}) precisa de ser considerada para o cálculo do K_e . A componente do K_e para esta fracção, K_{ep} , é então calculado conforme descrito na Tabela 2, estimando f_{ewp} como $1 - f_c - f_{ewi}$. f_c é estimado como o valor máximo entre f_c e $f_{r\ mulch}$, em que f_c é a fracção de cobertura do solo pela cultura e $f_{r\ mulch}$ é a fracção de solo coberto pelo filme de plástico.

No caso dos *mulches* orgânicos, a densidade e a altura/profundidade do *mulch*, e a fracção da superfície do solo por aquele coberta, determinam o valor da redução da evaporação. Uma regra geral aplicada a superfícies cobertas com *mulches* orgânicos prevê uma redução da evaporação do solo de cerca de 5% por cada 10% de solo coberto (Allen et al., 1998), pelo que as magnitudes de E_{pj} e E_{ij} (Tabela 2) deverão ser reduzidas proporcionalmente, o mesmo aplicando-se a K_{ei} e K_{ep} . O modelo SIMDualKc adopta estas indicações, embora o utilizador possa especificar um valor para a percentagem de redução da E_s diferente do sugerida acima. A percentagem de redução da E_s , combinada com a fracção de solo coberta pelo *mulch*, é o que vai determinar a redução total da evaporação (Fig. 3.14). Os dados de entrada do modelo incluem pois a percentagem de redução da E_s , a densidade do *mulch* e a fracção da superfície do solo por este coberta, estas duas últimas usadas para ajustar as fracções f_{ewi} e f_{ewp} . A Fig. 3.14 mostra a estrutura dos dados de entrada para a caracterização do *mulch* aplicada no modelo. O utilizador pode actualizar os dados ao longo do ciclo das culturas, de modo a ter em conta possíveis danos sofridos pelos filmes de plástico ou o ‘desgaste’ do *mulch* orgânico.

A caracterização do *mulch* aplicada em SIMDualKc para o ajuste de K_e é semelhante à adoptada no modelo Aquacrop (Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009). Embora os dois modelos sigam abordagens diferentes quanto ao cálculo de K_e , em ambos os utilizadores

devem introduzir a fracção de superfície do solo coberta por *mulch*, bem como a percentagem de redução da evaporação. No entanto, no caso dos *mulches* de plástico, o modelo SIMDualKc, contrariamente ao Aquacrop, não exige que o utilizador especifique a percentagem de redução da evaporação proveniente do interior do filme de plástico, já que só é considerada a evaporação que sai pelos orifícios por onde emergiram as plantas. Assim, a única informação necessária para o cálculo de K_e é a fracção de superfície do solo correspondente àqueles orifícios, que depende do número de linhas de plantas por filme de plástico, do espaçamento entre linhas de plantas, do espaçamento entre furos ao longo da linha, e do diâmetro dos furos (Fig. 13).

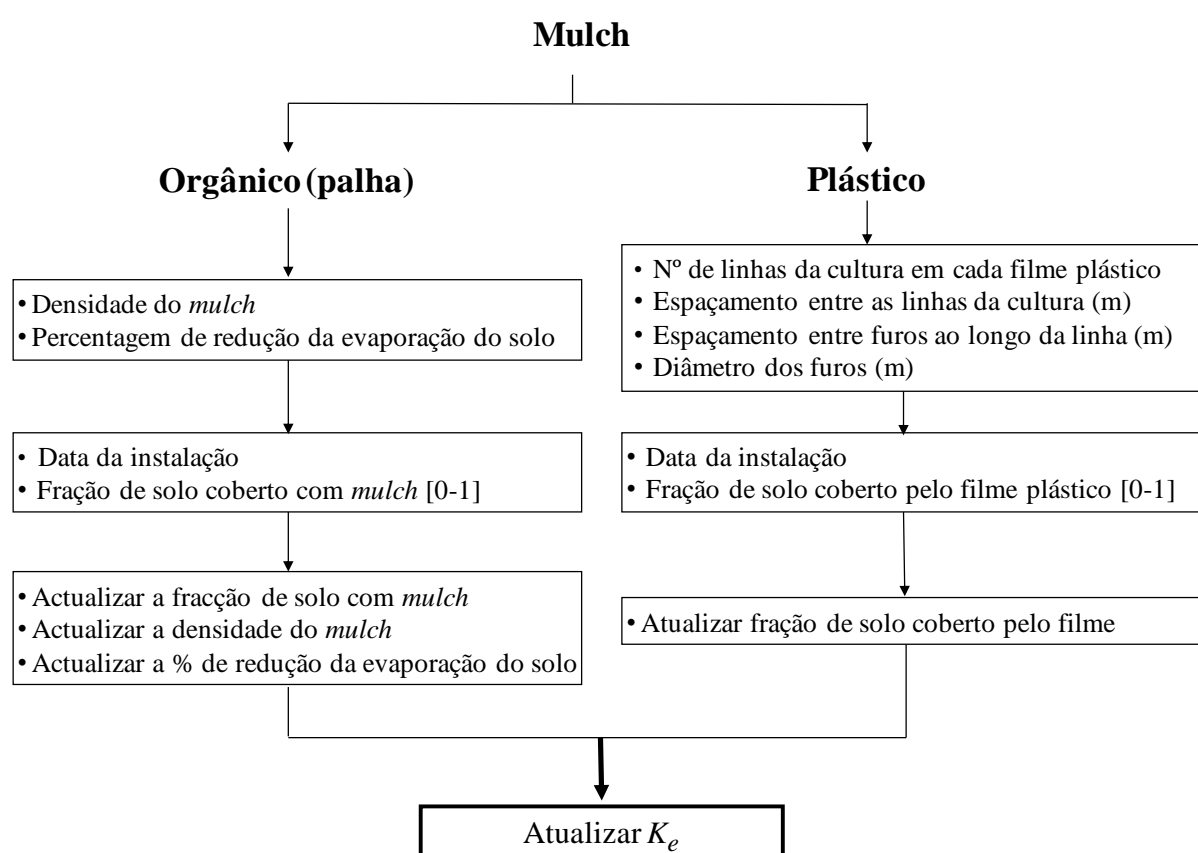


Fig. 3.14 Influência das características do *mulch* sobre o cálculo de K_e .

3.3.4. Requisitos de dados

Os dados de entrada no modelo SIMDualKc consistem em:

(a) Dados meteorológicos diários: temperaturas mínimas e máximas do ar, T_{\min} e T_{\max} [°C]; humidade relativa mínima, RH_{\min} [%], que pode ser calculada a partir de T_{\min} ; velocidade do vento a 2m de altura, u_2 [$m\ s^{-1}$]; evapotranspiração de referência, ET_o [mm], e precipitação, P [mm].

(b) Dados das culturas: datas do começo dos estádios inicial, de desenvolvimento rápido, intermédio e final (maturação ou começo da senescência), e data da colheita/fim da estação de crescimento; a profundidade radicular Z_r [m], a altura da cultura h [m] e a fracção de depleção de água do solo na ausência de stresse (p) para as fases de desenvolvimento atrás mencionadas; valores do coeficiente cultural de base (K_{cb}), já reflectindo as condições actuais de densidade da cultura ou, alternativamente, referindo-se a hipotéticas condições de cobertura total do solo ($K_{cb\ full}$), para as fases inicial, intermédia, e no final do ciclo; neste último caso, os dados necessários para o ajustamento de $K_{cb\ full}$ às condições actuais de densidade da cultura, nomeadamente, o valor de $K_{c\ min}$, o factor multiplicativo M_L , a fracção de cobertura do solo (f_c) pela cultura (especificada para as fases de desenvolvimento referidas atrás ou nas datas da sua medição), e, no caso de culturas em linha, a orientação e a largura da linha; datas inicial e final do período de dormência da cultura, por exemplo, se o solo congelar durante o inverno estando a cultura já instalada e a percentagem de redução de TEW e REW durante os períodos de solo congelado, por forma a considerar a redução na evaporação do solo (para culturas de inverno).

(c) Dados do solo: dados relativos à evaporação do solo, como sejam, a profundidade da camada superficial evaporativa do solo Z_e (m), o total de água evaporável (TEW, mm) e a água facilmente evaporável (REW, mm), estes dois últimos podendo ser introduzidos directamente ou calculados, respectivamente, através do teor de água do solo à capacidade de campo (θ_{FC} , $m^3\ m^{-3}$) e no coeficiente de emurchecimento (θ_{WP} , $m^3\ m^{-3}$), e a partir da percentagem dos lotes texturais do solo na camada evaporativa (Allen et al., 2005c); e dados relativos à disponibilidade de água no solo, nomeadamente o teor de água do solo à capacidade de campo (θ_{FC} , $m^3\ m^{-3}$) e no coeficiente de emurchecimento (θ_{WP} , $m^3\ m^{-3}$) para cada camada ou horizonte do solo, por forma a calcular a máxima disponibilidade de água no solo (TAW, mm).

(d) Dados da ascensão capilar: o modelo providencia três alternativas de acordo com procedimentos computacionais descritos na secção 3.2.6: (i) um único valor da ascensão capilar potencial (CR_{max}), a partir do qual o modelo deriva os valores actuais de CR durante o desenvolvimento das culturas; (ii) vários valores de CR_{max} em datas específicas ao longo da estação de crescimento; e (iii) dados requeridos pelas equações paramétricas propostas por Liu et al. (2006), conforme apresentado nas Tabelas 3.4 e 3.5.

(e) Dados de percolação profunda: O modelo oferece duas alternativas, conforme descrito na secção 3.2.6: (i) na primeira, que é a hipótese padrão, o modelo que assume que DP ocorre por

inteiro no mesmo dia em que a água no solo sobe acima de TAW, o que pressupõe uma drenagem instantânea de toda a água acima de TAW; (ii) na segunda, o utilizador introduz valores para os parâmetros a_{DP} (mm) e b_{DP} (Tabela 3.4) necessários à aplicação da equação paramétrica proposta por Liu et al. (2006).

(f) Dados do escoamento superficial, que consiste apenas na especificação do valor de CN_{II} , i.e., o ‘número de curva’ para a condição antecedente de humidade do solo média, a partir dos dados apresentados por Allen et al. (2007b).

(g) Dados da rega: i) dados relativos ao método de rega, nomeadamente a fracção de solo humedecida pela rega (f_w) e a máxima dotação de rega; ii) dados relativos à gestão de rega, como sejam as várias opções para definir limiares da ASW e dotações de rega; e iii) restrições à rega, conforme definido na secção 3.3.3.1 e na Fig. 3.11.

(h) Dados da cobertura vegetal activa do solo, conforme descrito na Secção 3.3.3.2 e resumidos na Fig. 3.13.

(i) Dados dos *mulches*: os dados para a caracterização dos mulches orgânicos e plásticos encontram-se descritos na Fig. 3.14, e são discutidos na Secção 3.3.3.3.

Os dados do clima, solo e das culturas são armazenados na base de dados do modelo SIMDualKc para utilização em simulações futuras. Os dados climáticos podem referir-se à ET_o calculada fora do SIMDualKc juntamente com outras variáveis climáticas necessárias para executar o modelo, ou a um conjunto completo de dados climáticos que é então utilizado pelo modelo para calcular a ET_o . Em alternativa, apenas T_{max} e T_{min} , na ausência de outros dados meteorológicos, podem ser usados para calcular ET_o através dos métodos de estimativa de dados climáticos em falta propostos em FAO-56, tal como analisado por Popova et al. (2006). Para simular um determinado cenário, os atributos identificadores (ID) dos dados apresentados acima são combinados na interface de simulação do modelo e depois é dada a ordem para executar o modelo. Os resultados obtidos podem ser exportados para um ficheiro de texto.

3. 4. Aplicações do SIMDualKc para a modelação da ET_c e do uso da água

O SIMDualKc tem sido utilizado em vários estudos visando a modelação do uso da água, da ET_c , e da partição desta entre T_c e E_s , em diferentes regiões do mundo e para uma série de culturas sob a influência do método de rega e de práticas de gestão da rega, do solo e das culturas. Nestes estudos o modelo foi aplicado com o objectivo de derivar coeficientes culturais para apoiar a programação da rega, melhorar ou avaliar o desempenho de diferentes estratégias de rega e o seu impacto na produção e na produtividade física ou económica da água. Na maioria destes estudos os resultados do modelo foram validados pela sua capacidade em simular correctamente as dinâmicas do teor de água do solo determinadas experimentalmente, enquanto num menor número de estudos os resultados do modelo foram validados por medições micrometeorológicas ou hidrológicas da ET_c , medições da T_c através de métodos de medição no fluxo de seiva e medições da E_s com microlisímetros. Assim, o modelo foi calibrado e validado com sucesso contra:

1) medições do teor de água do solo, para:

- Milho regado por canteiros de nível, com rega deficitária, rega orientada à máxima produção e em sequeiro (Rosa et al., 2012b)
- milho regado por aspersão, com rega deficitária e orientada à máxima produção em Portugal (Paredes et al., 2014);
- milho regado por aspersão e por gotejamento com solo coberto por *mulch* orgânico no sul do Brasil (Martins et al., 2013);
- milho regado por gotejamento no Uruguai com diferentes estratégias de rega e em sequeiro (Giménez et al., 2016);
- milho de sequeiro com toalha freática superficial na Região Autónoma da Mongólia Interior, China (Wu et al., 2015);
- cevada para malte com rega de complemento em Portugal (Pereira et al., 2015);
- trigo, em sequeiro e com rega de complemento por alagamento, na Síria (Rosa et al., 2012b)
- algodão, regado por sulcos, no Uzbequistão (Rosa et al., 2012)
- ervilha para indústria regada por aspersão em Portugal (Paredes et al., 2017)
- soja regada por gotejamento e com várias estratégias de rega e em sequeiro (Giménez et al., 2017)
- pastagem de sequeiro com toalha freática superficial na Região Autónoma da Mongólia

Interior, China (Wu et al., 2016);

- vinha regada por gotejamento na Galiza, Espanha (Fandiño et al., 2012);
- Lúpulo regado por gotejamento na Galiza, Espanha (Fandiño et al., 2015)
- Batata regada por gotejamento em Bari, Itália (Paredes et al., 2018)

2) medições do teor de água do solo e da evaporação do solo

- sequência trigo de inverno-milho de verão, com rega por canteiros de nível, na região das grandes planícies do norte da China (Zhao et al. 2013);
- soja, regada por alagamento, nas grandes planícies do norte da China (Wei et al., 2015)

2) medições da ET pelo método do balanço hídrico do solo, para:

- Trigo de inverno com sistema de rega sub-superficial e estratégia de rega deficitária (Gao et al., 2014)
- Malagueta, cultivada em estufa, regada por sulcos e com *mulch* de plástico na linha de plantas (Qiu et al., 2015)

3) medições da ET pelo método das flutuações instantâneas, para:

- sequência trigo de inverno-milho de verão, com rega por canteiros de nível, na região das grandes planícies do norte da China (Zhang et al. 2013);
- algodão, regado com fita gotejadora sob *mulch* de plástico, no noroeste da China (Tian et al., 2016)

4) medições da ET pelo método das flutuações instantâneas, T_c através do fluxo de seiva e E_s com microlisímetros, para:

- milho, cultivado sobre *mulch* de plástico e regado por sulcos, na província de Gansu, noroeste da China (Ran et al., 2017);
- pessegueiro, regado por gotejamento em Portugal (Paço et al., 2012);
- olival, regado por gotejamento em Portugal (Paço et al., 2014)

Na Tabela 3.7 apresentam-se os indicadores da qualidade do ajustamento (que foram comumente utilizados nos estudos referidos acima) entre as previsões do modelo para diferentes variáveis ($ET_{c\ act}$, $T_{c\ act}$, E_s , ASW e SWC), variando consoante o estudo, e os valores medidos dessas variáveis.

Tabela 3.7. Indicadores da qualidade do ajustamento entre os valores das variáveis simuladas pelo modelo e os valores medidos dessas variáveis para uma série de estudos que utilizaram o SIMDualKc.

Referência	Cultura	Variável validada no modelo	Indicadores de ajustamento na calibração			
			b ₀	R ²	RMSE (mm ou cm ³ cm ⁻³)	EF
Rosa et al. 2012	Milho	ASW (mm)	1.00	0.99	4.5	1.00
	Trigo	ASW (mm)	1.01	0.98	5.5	0.97
	Algodão	ASW (mm)	1.00	0.93	8.6	0.91
Zhao et al., 2013	Trigo inverno	ASW (mm)	1.00	0.98	0.005*	0.98
		E _s (mm)	1.10	0.86	0.37	0.74
	Milho	ASW (mm)	1.00	0.96	0.006*	0.92
		E _s (mm)	1.00	0.87	0.49	0.85
Zhang et al., 2013	Trigo de inverno	Evapotranspiração actual	1.02	0.91	0.56	0.90
	Milho	Evapotranspiração actual	1.06	0.83	0.43	0.77
Martins et al., 2013	Milho	ASW (mm)	1.02	0.88	6.0	0.84
	Milho	ASW (mm)	1.00	0.97	5.5	0.97
Paredes et al., 2014	Milho	ASW (mm)	0.99	0.85	6.3	0.84
Wu et al. 2015	Milho	ASW (mm)	0.99	0.93	0.007*	0.93
Giménez et al., 2016	Milho	ASW (mm)	0.98	0.88	0.010*	0.84
Ran et al., 2017	Milho	Evapotranspiração atual	0.95	0.87	0.94	-
		Transpiração actual	0.89	0.95	0.79	-
		E _s (mm)	0.86	0.52	0.17	-
Gao et al., 2014	Trigo	ET _{c act} (mm)	1.01	0.95	0.39	0.94
Pereira et al., 2015	Cevada	ASW (mm)	0.99	0.96	0.009*	0.90
Paredes et al., 2017	Ervilha	ASW (mm)	1.01	0.94	0.009*	0.92
Paredes et al., 2018	Batata	ASW (mm)	1.00	0.94	0.008	0.91
Wei et al., 2015	Soja	ASW (mm)	0.99	0.93	10.7	0.80
		Evaporação do solo (teste)	0.97	0.85	0.52	0.76
Giménez et al., 2017	Soja	ASW (mm)	0.99	0.65	0.019*	0.63
Tian et al., 2016	Algodão	Evapotranspiração da cultura actual (calibra)	0.95	0.87	0.68	0.89
Qiu et al., 2015	Malagueta	Evapotranspiração atual	0.95	0.64	0.47	-
		transpiração actual (teste)	0.98	0.72	0.39	-
Fandiño et al., 2015	Lúpulo	ASW (mm)	0.99	0.90	0.015*	0.81
Wu et al., 2014	Pastagem	ASW (mm)	0.99	0.91	0.008*	0.90
Paço et al., 2012	Pessequeiro	evapotranspiração atual	1.05	0.56	0.45	-
		Transpiração actual	1.06	0.49	0.45	-
		Evaporação do solo	0.97	0.26	0.09	-
Fandiño et al., 2012	Vinha	ASW (mm)	1.00	0.97	0.80	0.97
Paço et al., 2014	Olival	transpiração actual (fluxo de seiva)	0.99	0.71	0.40	0.66
		evapotranspiração atual (eddy covar.)	1.00	0.71	0.37	0.57

3.5. Conclusões

O modelo SIMDualKc incorpora procedimentos padronizados para a aplicação da versão FAO-56 do método dos K_c duais, assim como um conjunto de extensões visando o refinamento daquela metodologia, oferecendo uma forma conveniente de armazenar e aceder a dados descritivos para o cálculo do consumo de água pelas culturas e para a calendarização da rega. O modelo também demonstra a lógica e a estrutura necessárias para a implementação do método dos K_c duais num *software* interactivo. A abordagem dos K_c duais providencia uma estimativa prática e relativamente precisa da ET_c para fundamentar a simulação de calendários de rega, em particular para culturas com cobertura parcial do solo. A abordagem produz estimativas diárias para a evaporação do solo (E_s) com base no balanço hídrico diário da camada superficial do solo, e estima a transpiração actual das culturas ($T_{c\ act}$) utilizando um balanço hídrico do solo para a zona radicular. A separação da E_s e da T_c contribui para uma melhor percepção do uso de água pelas culturas.

O modelo efectua o cálculo separado da evaporação proveniente da fracção da superfície do solo humedecida pela rega e pela precipitação da evaporação do solo proveniente da fracção humedecida apenas pela precipitação, melhorando assim a precisão dos cálculos. Para além disso, o modelo utiliza uma extensão para simular a depleção da água da camada superficial através da extracção radicular para além da ocorrida por evaporação.

O modelo SIMDualKc contém procedimentos para adaptar o cálculo do K_{cb} a condições diferentes das condições padrão, i.e., quando as culturas apresentam densidade, área foliar, altura, fertilidade ou vitalidade inferiores às correspondentes em condições óptimas. Esta adaptação é importante porque os valores tabelados de K_{cb} representam geralmente boas condições de gestão para culturas com cobertura total, podendo agora serem adaptados a casos em que as culturas não cobrem completamente o solo, nomeadamente, vinhas e pomares. O modelo contempla a simulação do consumo de água pelas coberturas vegetais do solo activas, incluindo os efeitos sobre este da aplicação de múltiplas operações para controlar o excessivo desenvolvimento das coberturas vegetais e reduzir assim a sua competição pela água disponível. Uma outra extensão permite a simulação dos efeitos dos *mulches* na redução da evaporação do solo. Procedimentos recentemente implementados no modelo relativos à estimação da ET_c e do uso da água em consociações de culturas (especialmente indicado para quando existe um desfasamento temporal no desenvolvimento das duas culturas consociadas) e para a consideração dos efeitos de condições transitórias de salinidade do solo na T_c e na E_s , fazem do modelo uma ferramenta interessante para a calendarização e gestão da rega nestas

condições específicas. Finalmente o modelo implementa uma série de extensões hidrológicas, como sejam o cálculo da percolação profunda, da ascensão capilar e do escoamento superficial da precipitação não infiltrada, que melhoram as capacidades de simulação do balanço hídrico do solo.

Capítulo 4

Modelação da evapotranspiração e do uso da água em cobertos lenhosos descontínuos. Aplicação a pomares de pereira ‘Rocha’ e limoeiro

4.1. Introdução

Os cobertos vegetais lenhosos, nomeadamente as árvores de fruto, apresentam características que os fazem diferir significativamente da maioria das culturas herbáceas (cereais, hortícolas, pastagens, etc.) relativamente ao consumo de água, i.e., à evapotranspiração cultural (ET_c). Assim, fruto da sua elevada estatura e cobertura incompleta ou descontínua do solo estão intimamente ligados ou acoplados ao ar circundante, apresentando reduzida resistência aerodinâmica e elevado controlo estomático (Paço, 2003). A cobertura parcial do solo também origina zonas diferenciadas relativamente à absorção da radiação e às trocas de calor sensível e latente: o coberto vegetal, o solo sombreado debaixo deste e o solo exposto à radiação solar nas zonas não cobertas. Além disso, existe uma interacção entre os fluxos daquelas diferentes proveniências. Assim, por exemplo, a microadvecção de calor sensível do solo nas entrelinhas, especialmente quando seco, para as copas das árvores pode aumentar a transpiração (Allen e Pereira, 2009) ou contrariamente induzir o encerramento dos estomas (Paço et al., 2003). A condução em linhas, muitas vezes utilizada neste tipo de cobertos, origina variações microclimáticas nos planos horizontal e vertical com impacto na ET_c , nomeadamente a quantidade de radiação interceptada, as temperaturas de superfície e o regime de turbulência de um lado e do outro da linha (Paço, 2003).

Com o objectivo de avaliar o desempenho do modelo SIMDualKc em simular a ET_c e o uso da água neste tipo de cobertos, foram instalados num pomar de pereira ‘Rocha’ e noutro de limoeiro, dispositivos experimentais para a monitorização do teor de água do solo (TAS) na zona radicular das culturas ao longo de dois ciclos de desenvolvimento/duas campanhas de rega (2013 e 2014). Assim, e uma vez que o dispositivo experimental consiga captar a heterogeneidade da distribuição vertical e horizontal do teor de humidade do solo e do sistema radicular, e se os dados meteorológicos recolhidos, bem como os calendários de rega fornecidos pelos produtores, traduzirem fidedignamente as condições da parcela, então uma boa concordância entre os valores da ASW medida e simulada indicam que o modelo simulou correctamente a ET_c .

As simulações foram realizadas utilizando dados do solo, das culturas, da rega e da água subterrânea recolhidos nos locais dos ensaios, e dados meteorológicos de uma ou mais

estações próximas. Os dados do solo incluíram as propriedades hidráulicas básicas e o teor de água em diferentes profundidades da zona radicular das culturas; os dados da cultura incluíram datas relevantes do seu ciclo de desenvolvimento, a fracção da radiação fotossinteticamente activa (PAR) intersectada pela cultura (f_{PAR}), a altura da cultura (h_{crop}) e a profundidade radicular; e os dados relativos à toalha freática resumiram-se à sua profundidade ao longo do tempo. Quanto aos dados meteorológicos, no estudo de caso do pomar de limoeiros, a precipitação (P) e os dados necessários à estimação da evapotranspiração de referência (ET_o) pela equação FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) provieram da estação meteorológica adjacente à parcela, enquanto que no da pereira ‘Rocha’, as estimativas de P e ET_o para o local dos ensaios foram obtidos, respectivamente, por interpolação espacial dos valores registados ou calculados em quatro estações meteorológicas próximas e circundantes à parcela.

Outras informações necessárias para correr o modelo que não as observadas *in-situ* ou analisadas em laboratório, foram estimadas ou retiradas de ‘tabelas padrão’ (Allen et al., 1998; Allen e Pereira, 2009; Liu et al., 2006), nomeadamente: 1) os parâmetros destinados ao cálculo dos coeficientes culturais de base (K_{cb}) ajustados às condições actuais de densidade da cultura (ponto 3.2.2), nomeadamente: *i*) os K_{cb} respeitantes a condições de cobertura total do solo ($K_{cb\ full}$); *ii*) o valor mínimo de K_c para solo não vegetado ($K_{c\ min}$), correspondendo à evaporação residual do solo; e *iii*) o parâmetro M_L , destinado a impor um limite máximo para a ET_c por unidade de solo coberto; 2) parâmetros relativos à sensibilidade da cultura ao stress hídrico (ponto 3.2.4), resumindo-se à fração de depleção da água do solo em conforto hídrico - p ; 3) parâmetros relativos à evaporação do solo (pontos 3.2.1.2 e 3.2.5), nomeadamente, a espessura da camada evaporativa do solo (Z_e), a água evaporável total (TEW) e a água facilmente evaporável (REW); e 4) parâmetros para estimar a percolação profunda e a ascensão capilar (ponto 3.2.6), apenas necessários para o estudo de caso do pomar de pereira ‘Rocha’, dada a presença de uma toalha freática a pouca profundidade.

Estes parâmetros ‘padrão’ foram projetados para serem transferidos e usados em diferentes regiões, mas podem necessitar de serem calibrados para as condições locais, nomeadamente quanto ao clima, variedades culturais utilizadas, características do solo e práticas de gestão das culturas e do solo. Assim, os valores padrão de $K_{cb\ full}$, $K_{c\ min}$, p , Z_e , TEW, REW, parâmetros da ascensão capilar (CR) e da percolação profunda (DP) foram calibrados para as condições locais através de um procedimento por ‘tentativa e erro’ até minimizar as diferenças entre os valores da água disponível no solo (ASW) medida e simulada para uma

das réplicas do dispositivo experimental num dos anos. A validação do modelo consistiu em usar os valores calibrados para correr o modelo em condições independentes das da calibração, e verificar se os ajustes efectuados conduziram igualmente a uma boa concordância entre os valores da ASW simulados e observados.

Para avaliar a qualidade do ajustamento entre a ASW prevista pelo modelo SIMDualKc e a ASW observada, foram utilizados meios qualitativos e estatísticos; os primeiros consistiram na inspecção visual dos gráficos das séries temporais da ASW observada vs. simulada com o objectivo de detectar tendências na modelação e quando elas ocorreram; os segundos recorreram à regressão linear forçada à origem e à regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, fornecendo respectivamente, o coeficiente da regressão (b_0), indicativo da proximidade estatística entre os valores observado e simulados, e o coeficiente de determinação (R^2), indicativo da percentagem da variabilidade total dos dados observados que é explicada pelo modelo. Além disso, utilizou-se um conjunto de indicadores estatísticos que descrevem os erros de estimação.

4.2. Base para a modelação

4.2.1. Avaliação da qualidade dos dados meteorológicos

O cálculo da evapotranspiração de referência (ET_0) pela equação FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998), pressupõe que os dados meteorológicos utilizados: temperatura máxima (T_{\max}) e mínima (T_{\min}), humidade relativa máxima (RH_{\max}) e mínima (RH_{\min}), radiação solar (R_s) e velocidade do vento a 2 metros de altura (u_2), sejam medidos em estações meteorológicas instaladas sobre um relvado extenso, de altura uniforme, cobrindo totalmente o solo, plenamente abastecido de água e inserido numa ampla zona de produção agrícola de regadio (Allen, 1996; Allen et al., 1998, 2008). Isto deve-se ao facto de que para a equação FAO-PM traduzir fidedignamente a ET da dita superfície de referência, nos dados meteorológicos utilizados devam estar implícitas as interacções específicas entre aquela superfície e a camada limite atmosférica, nomeadamente a partição da radiação disponível (R_n) entre calor sensível (H) e calor latente (λE) (Allen et al., 2008). Ora o pleno cumprimento destes requisitos é na prática muitas vezes difícil, tal como sucede no caso das quatro estações meteorológicas utilizadas neste estudo, o que não quer dizer que os dados por elas medidos não possam ser utilizados, desde que cumpram alguns requisitos básicos. Assim, embora as estações não estejam instaladas sobre um amplo relvado com as características padrão supracitadas, elas encontram-se posicionadas no seio de parcelas regadas (essencialmente

pomares), em pequenas clareiras com vegetação espontânea para não impedir a livre circulação do vento, e inseridas em amplas zonas de produção agrícola maioritariamente de regadio, o que dá algumas garantias que as condições locais da partição da R_n entre H e λE não se traduza em valores dos dados meteorológicos muito díspares relativamente aos que se verificariam num relvado padrão inserido nas mesmas parcelas.

As quatro estações meteorológicas utilizadas neste estudo (Fig. 4.4) foram instaladas em 2010 pelo Centro Operativo Hortofrutícola Nacional (COTHN), organismo também responsável pela sua manutenção. A estação da Silveira está instalada numa pequena clareira localizada no centro de uma parcela de cerca de 8 ha de pereira ‘Rocha’, rodeada por outros pomares, forragens, hortícolas, vinha e cereais destinados à produção de feno. A de Runa também está instalada numa parcela de pereira ‘Rocha’, com cerca de 30 ha, ladeada essencialmente por outros pomares, vinha e cultura cerealífera (feno). A do carrascal numa parcela inculta mas rodeada por pomares de pereira ‘Rocha’ e cereais para feno, numa zona de várzea. A da Barreiralva está instalada num pomar de limoeiros, sendo ladeada outros pomares de limoeiros e por pequenas manchas de espécies florestais.

A avaliação da qualidade dos dados começou pela inspecção visual dos gráficos das séries horárias de todas as variáveis meteorológicas, no sentido de identificar períodos em que os valores se afastassem claramente do padrão geral de comportamento. Deste modo foi possível excluir deste estudo, logo à partida, os dados de RH e u_z referentes à estação da Barreiralva, uma vez que se constatou que a partir de 18-12-2012 os valores máximos da RH começaram a decrescer ficando consistentemente abaixo dos 60% e que os valores da u_z estavam logo desde o início sistematicamente próximo de 0, atingindo apenas muito esporadicamente valores máximos da ordem dos 0.5 m s^{-1} , o que é claramente indicativo de um mau funcionamento de ambos os sensores. Os valores das restantes variáveis na estação da Barreiralva, i.e., T_{ar} , R_s e P , revelaram-se consistentes assim como todas as variáveis meteorológicas nas restantes estações, pelo menos a este nível de análise.

A análise visual das séries horárias das variáveis meteorológicas também permitiu constatar a coerência entre as séries da RH, T_{ar} , R_s e P para todas as estações: Assim, verificou-se que: 1) a baixas amplitudes da variação diurna da RH corresponderam consistentemente reduzidas amplitudes da variação diurna da T_{ar} e da R_s , passando-se o oposto para elevadas amplitudes da variação diurna da RH; 2) em dias com P elevada a RH apresentou sempre valores elevados e com reduzida amplitude de variação diurna; 3) dias com baixos valores de R_s apresentaram consistentemente reduzidas amplitudes de variação da T_{ar} ; 4) a dias com elevada

P corresponderam sempre valores baixos da R_s ; e 5) dias com P elevada apresentaram reduzidas amplitudes de variação da T_{ar} . Também se verificou que a ocorrência esporádica, durante períodos de dois ou três dias, de reduções bruscas e acentuadas dos valores da RH era acompanhada por valores anormalmente altos nas séries da T_{ar} , indiciando a ocorrência de fenómenos climáticos extremos de curta duração.

O segundo passo da avaliação da qualidade dos dados climáticos começou com a conversão dos valores horários das variáveis para valores diários. As séries de valores diários da R_s foram então dispostas num gráfico juntamente com os valores da radiação solar em dias de céu limpo (R_{so}) calculados segundo Allen et al. (2008), constituindo estes últimos um limite superior para os primeiros. Verificou-se deste modo que para todas as estações à excepção da estação da Barreiralva, os valores medidos da R_s ficavam consistentemente abaixo da R_{so} , enquanto que na da Barreiralva a R_s medida sobrestimou em 7% a R_{so} (Fig. 4.1a), pelo foi aplicado um factor de correcção multiplicativo, tal como sugerido em Allen et al. (2008), apresentando-se os valores corrigidos de R_s na Fig. 4.1b.

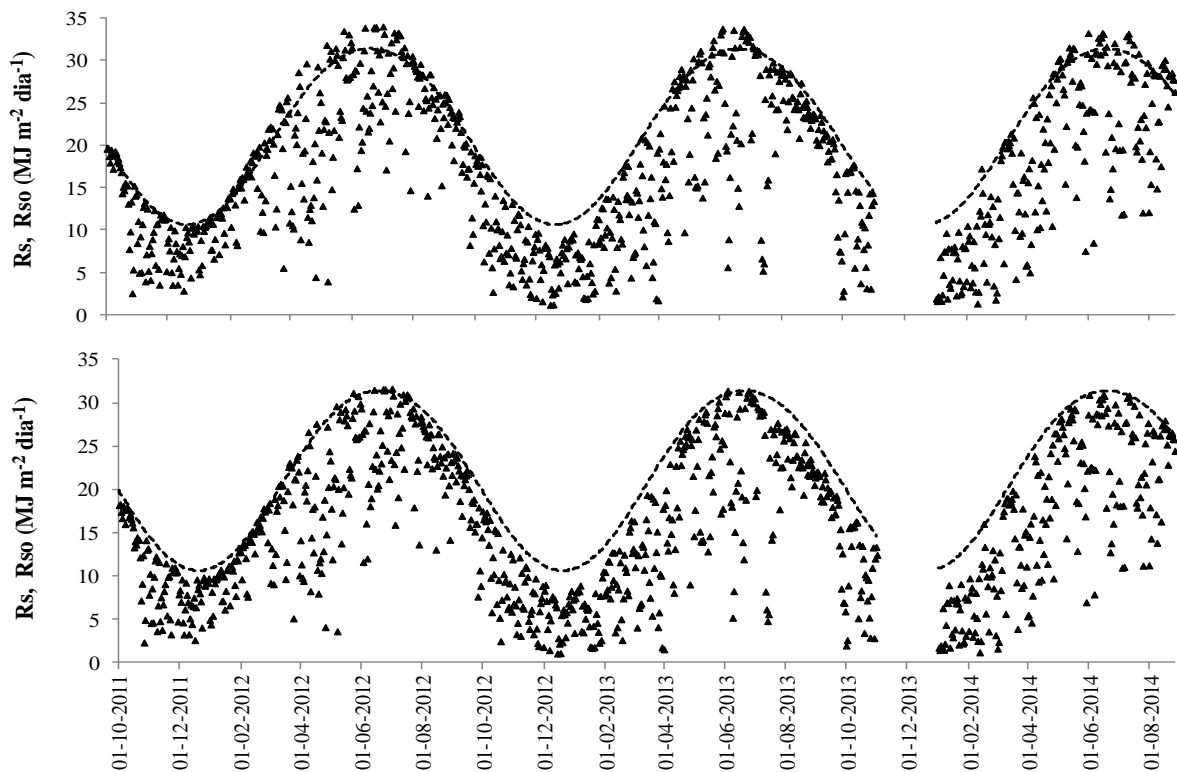


Fig. 4.1. Valores diários da radiação solar de curto comprimento de onda medidos (R_s) e da radiação solar esperada (Allen et al., 2008) em dias de céu limpo (R_{so}).

Em seguida os valores diários de T_{max} , T_{min} , RH_{max} , RH_{min} , R_s , P e u_z de cada uma das estações foram dispostos em diagramas de dispersão contra a média diária dos respectivos

valores homólogos dessas variáveis nas outras estações (no caso da RH e da u_z esta média não incluiu a estação da Barreiralva pelas razões apresentadas anteriormente), tendo-se realizado de seguida uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados e outra forçada à origem entre cada uma das séries. Este procedimento permitiu averiguar a consistência dos dados diários de cada estação, já que estando as quatro estações na mesma região climática, é de esperar um grau de associação elevado entre os valores de uma dada variável registados numa dessas estações e os valores ‘regionais’ dessa mesma variável, pelo menos para as variáveis que apresentam mais baixa variabilidade espacial. O grau de associação foi avaliado em termos do coeficiente de determinação (R^2) da regressão pelo método dos mínimos quadrados e do declive (b_0) da recta de regressão forçada à origem. Assim, obtiveram-se correlações elevadas em todas as estações ao nível da T_{\max} ($0.90 < b_0 < 1.14$ e $0.92 < R^2 < 0.99$), T_{\min} ($0.93 < b_0 < 1.10$ e $0.94 < R^2 < 0.98$), R_s ($0.97 < b_0 < 1.06$ e $0.94 < R^2 < 0.98$) e RH_{\min} ($0.84 < b_0 < 1.16$ e $0.80 < R^2 < 0.96$) (Tabela 4.1). Já ao nível da RH_{\max} e da P , verificaram-se correlações mais fracas entre os valores medidos nas estações e as médias regionais: RH_{\max} ($0.98 < b_0 < 1.02$ e $0.55 < R^2 < 0.69$) e P ($0.61 < b_0 < 1.44$ e $0.59 < R^2 < 0.80$), enquanto que no caso da u_z a correlação foi muito fraca ($0.54 < b_0 < 1.95$ e $0.09 < R^2 < 0.55$).

Tabela 4.1. Proximidade estatística e grau de associação linear entre os valores das variáveis meteorológicas de cada estação e os seus homólogos regionais, avaliados em termos do declive da recta de regressão forçada à origem (b_0) e do coeficiente de determinação (R^2) da regressão linear pelo método dos mínimos quadrados.

		Média regional						
		T_{\max}	T_{\min}	RH_{\max} (%)	RH_{\min} (%)	R_s (%)	U_z (mm)	P
Carrascal	b_0	0.96	0.97	0.99	1.0	0.99	0.57	1.44
	R^2	0.97	0.91	0.69	0.96	0.98	0.16	0.69
Barreiralva	b_0	0.99	1.09	-	-	0.98	-	0.84
	R^2	0.98	0.80	-	-	0.98	-	0.59
Runa	b_0	1.14	0.93	0.98	0.84	0.96	0.54	0.96
	R^2	0.97	0.94	0.54	0.80	0.98	0.09	0.80
Silveira	b_0	0.91	0.97	1.02	1.15	1.05	1.95	0.61
	R^2	0.92	0.88	0.54	0.81	0.96	0.55	0.65

Na Fig. 4.2, apresentam-se em diagramas de dispersão os valores diários das variáveis climáticas medidas na estação do Carrascal contra os seus homólogos regionais, especificando-se o declive e a ordenada na origem da recta ajustada aos dados pelo método dos mínimos quadrados e o coeficiente de determinação (R^2).

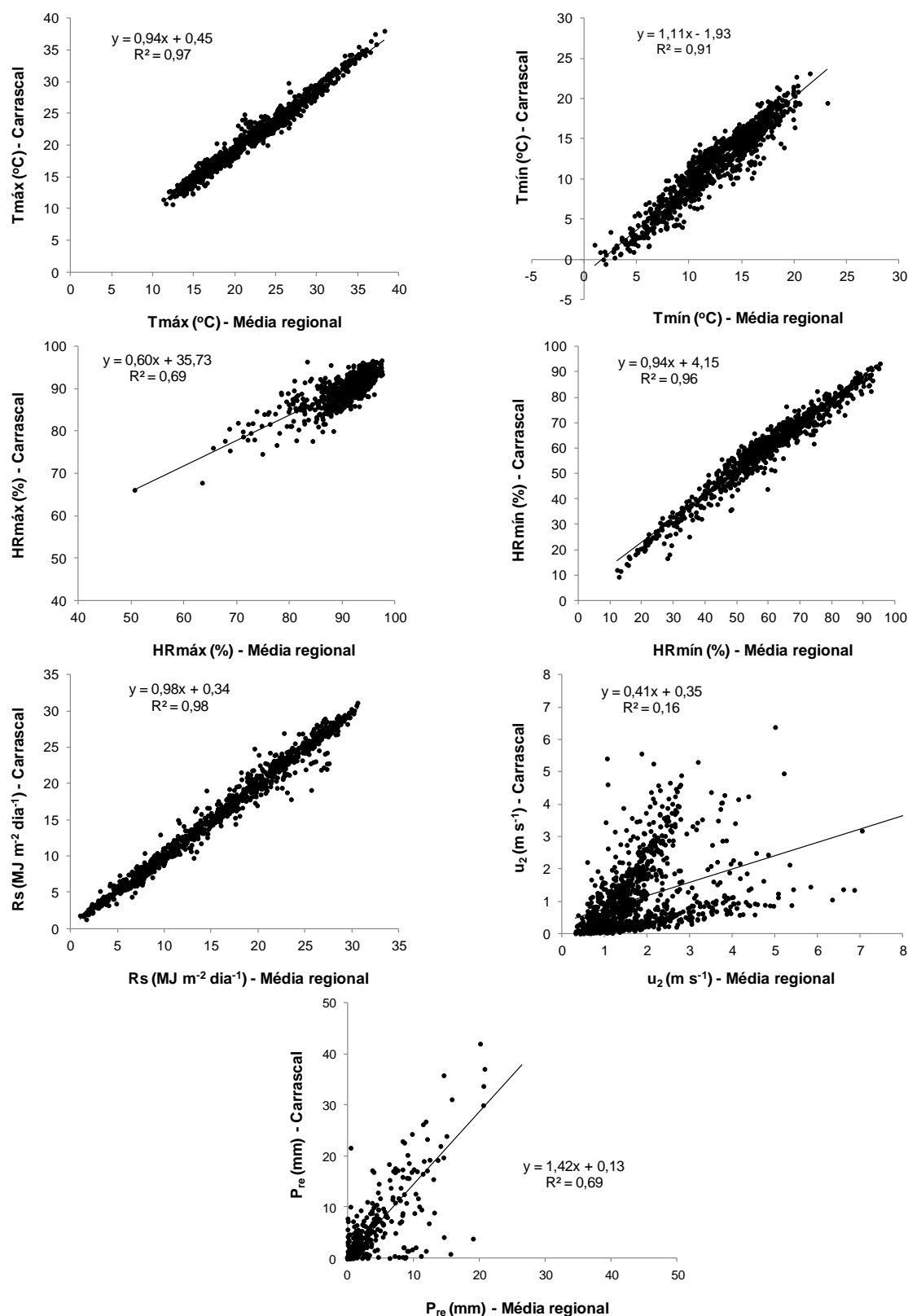


Fig. 4.2. Diagramas de dispersão relacionando os valores de $T_{\text{máx}}$, $T_{\text{mín}}$, $RH_{\text{máx}}$, $HR_{\text{mín}}$, R_s , P e u_{2t} medidos na estação do Carrascal com os respectivos valores homólogos regionais, com especificação do declive e da ordenada na origem da recta ajustada aos dados pelo método dos mínimos quadrados e o coeficiente de determinação (R^2).

Por fim foram analisados os valores acumulados (entre 2011 e 2014) da diferença entre os valores diários das variáveis medidos em cada estação e os previstos pelas rectas de regressão similares às da Fig. 4.2, i.e., os resíduos, no sentido de detectar quebras de homogeneidade nos valores das variáveis em cada estação (Fig. 4.3). Períodos relativamente longos de crescimento dos resíduos acumulados seguidos de um decréscimo, ou vice-versa, poderá ser indicativo de uma quebra de homogeneidade das séries (Allen et al., 1998; Rosa et al., 2010). No entanto, ao nível diário é difícil decidir perentoriamente se uma evolução dos valores medidos num determinado período em sentido contrário ao verificado noutros períodos, constitui uma quebra de homogeneidade ou corresponde apenas à variabilidade climática entre os locais. De resto não foram detectados períodos suficientemente longos de crescimento (ou decréscimo) dos resíduos acumulados seguidos de decréscimo (ou crescimento) que indicassem claramente uma quebra de homogeneidade, pelo que todas as séries, à excepção da u_z , que não foi sequer analisada quanto a este aspecto por falta de correlação com a respectiva série regional, foram aceites como homogéneas.

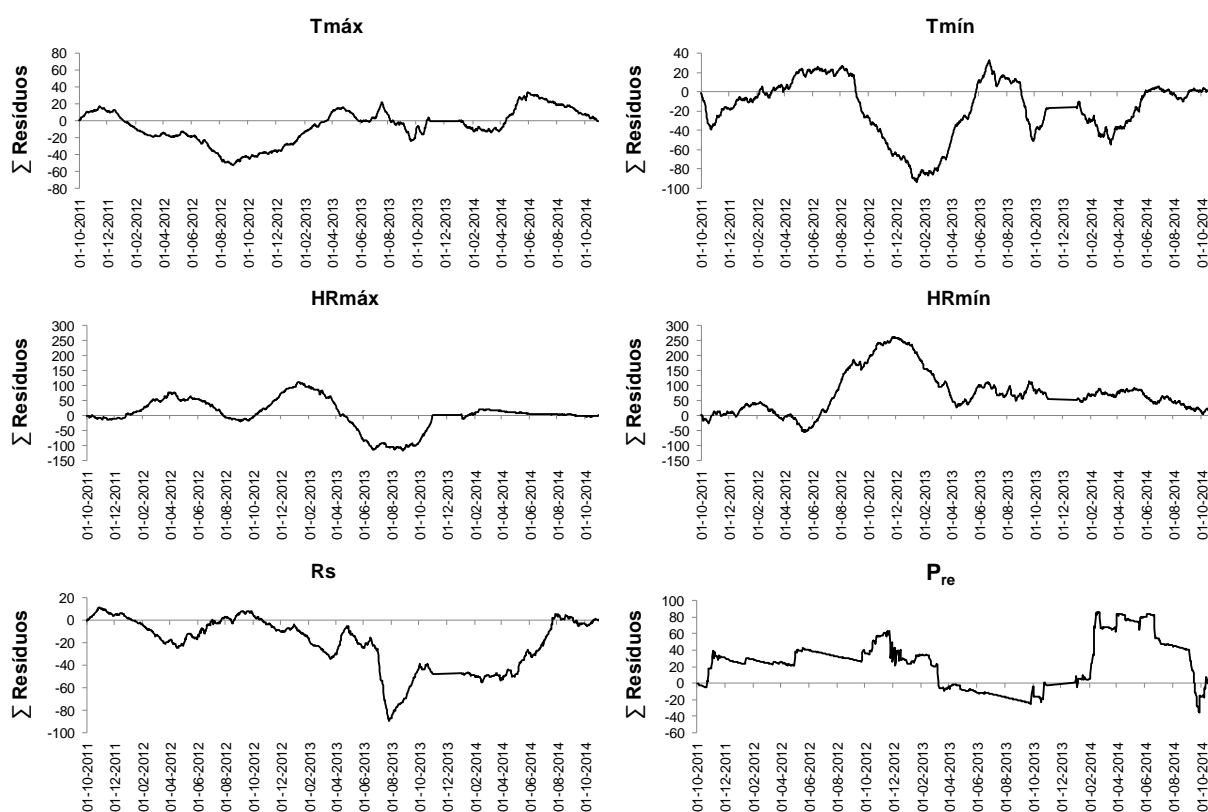


Fig. 4.3. valores acumulados da diferença entre os valores diários de T_{\max} , T_{\min} , RH_{\max} , HR_{\min} , R_s e P medidos na estação do Carrascal e os previstos pelas rectas de regressão apresentadas na Fig. 4.2.

4.2.2. Calibração e validação do modelo SIMDualKc

A calibração do modelo consistiu em ajustar os valores padrão dos parâmetros da cultura ($K_{cb \text{ full}}$, M_L e p), da evaporação do solo (Z_e , TEW e REW) (Allen et al., 1998; Allen e Pereira, 2009), e da ascensão capilar e da percolação profunda (Liu et al., 2006), for forma a minimizar as diferenças entre os valores da ASW medida e simulada respeitantes à réplica 1 do dispositivo experimental em 2013. O parâmetro $K_{c \text{ min}}$ (0-0.15), necessário juntamente com o parâmetro M_L e a f_c da cultura, ao ajustamento dos $K_{cb \text{ full}}$ às condições actuais de densidade, não foi ajustado, tendo-se considerado $K_{c \text{ min}} = 0.05$. Isto deveu-se ao facto de $K_{c \text{ min}}$ representar a evaporação residual do solo, integrada no K_{cb} e não no K_e , i.e., a lenta difusão de vapor de água a partir de camadas do solo situadas abaixo da camada evaporativa de espessura Z_e (Allen et al., 1998), e que está portanto dependente do teor de água nessas camadas, logo dependente da frequência e intensidade dos humedecimentos pela rega e precipitação. Assim, sendo reduzida a fracção do solo humedecida pela rega (f_w) e sendo a precipitação pouco frequente no período em que a ET_c é mais elevada, aquele valor parece apropriado para as condições deste estudo e também seguindo Paço et al. (2012), que assumiu $K_{c \text{ min}} = 0$ num pomar de pessegueiros regado por gotejamento.

Em ambos os estudos de caso, i.e., no da pereira ‘Rocha’ e no dos limoeiros, começou-se por ajustar em primeiro lugar os parâmetros para os quais a ASW apresentou maior sensibilidade: $K_{cb \text{ full}}$ (por via do parâmetro F_r de ajustamento estomático), M_L e parâmetros da CR e da DP no primeiro caso, e $K_{cb \text{ full}}$, M_L e p no segundo. Assim, no caso da pereira ‘Rocha’, o primeiro passo consistiu em averiguar qual dos três tipos de solo ‘modelo’ (Liu et al., 2006), ou melhor, qual dos conjuntos de parâmetros da CR a estes associados, melhor representava as condições locais da CR. Para isso efectuaram-se simulações do balanço hídrico do solo, mantendo fixos os valores padrão de M_L , p , Z_e , TEW e REW (e $K_{c \text{ min}} = 0.05$), e fazendo variar $K_{cb \text{ full}}$, com o objectivo de averiguar para qual dos conjuntos de parâmetros padrão CR associados a cada tipo de solo ‘modelo’, a ASW simulada seguiu mais de perto as dinâmicas da ASW medida. Uma vez seleccionado o conjunto de parâmetros da CR mais representativo, recorreu-se a um procedimento iterativo de tentativa e erro para encontrar uma combinação de valores de $K_{cb \text{ full}}$, M_L , dos parâmetros da CR (apenas a_1 e a_2) e da DP, que conduzissem ao melhor ajustamento possível (visualmente e com recurso a indicadores estatísticos) entre a ASW medida e simulada. No final, procedeu-se ao ajustamento dos parâmetros Z_e , TEW e REW com a finalidade de ‘afinar’ a aderência entre a ASW medida e simulada. O parâmetro p não foi sujeito a qualquer ajustamento pois os valores do teor de água do solo medidos mantiveram-se

sempre elevados, revelando-se a ASW simulada insensível aos valores de p . No caso do pomar de limoeiros, procurou-se, por tentativa e erro, encontrar uma combinação de valores de $K_{cb \text{ full}}$, M_L e p , mantendo fixos os valores padrão de Z_e , TEW e REW (e $K_{c \text{ min}} = 0.05$), que conduzissem à minimização das diferenças entre a ASW medida e simulada. No fim, foram feitos ajustes aos parâmetros Z_e , TEW e REW para ‘afinar’ a aderência entre a ASW medida e simulada.

Com o objectivo de verificar se o caminho seguido aquando da calibração foi o correcto, os valores dos parâmetros calibrados através do procedimento acima referido foram sujeitos a validação, i.e., foram utilizados para correr o modelo e simular a ASW para as condições independentes da réplica 2 do dispositivo experimental em 2013 e em ambas as réplicas em 2014. Sempre que os resultados da validação não se revelaram apropriados, i.e., sempre que a ASW simulada se revelou claramente díspar em relação à ASW medida, o processo de calibração foi repetido até a validação mostrar que o sentido dos ajustes durante calibração foi o correcto.

Para avaliar a qualidade do ajustamento das previsões da ASW pelo modelo SIMDualKc à ASW medida, foi utilizado um conjunto de indicadores estatísticos que descrevem os resíduos entre as estimativas e as observações, tal como empregados noutros estudos e aplicações (Green and Stephenson, 1986; Loague e Green, 1991; Liu et al., 1998; Legates e McCabe, 1999; Cholpankulov et al. 2008 Moriasi et al., 2007, Popova e Pereira, 2011). Estes indicadores encontram-se listados abaixo, onde O_i e P_i ($i = 1, 2, \dots, n$) representam, respectivamente, os pares de valores observados e simulados para uma determinada variável, e \bar{O} e \bar{P} são os respectivos valores médios:

- O coeficiente da regressão forçada à origem (b) e o coeficiente de determinação (R^2) da regressão pelo método dos mínimos quadrados, definidos por:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i}{\sum_{i=1}^n O_i^2} \quad (4.1)$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad (4.2)$$

- O erro quadrático médio, *RMSE*, que caracteriza a variância dos erros de estimação:

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (4.3)$$

- O erro absoluto médio, *AAE*, que expressa a dimensão média dos erros de estimação:

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (4.4)$$

- O erro relativo médio, *ARE* [%], que expressa a dimensão do erro em termos relativos:

$$ARE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \quad (4.5)$$

- A eficiência da modelação, *EF*, que é a diferença entre a unidade (1) e o rácio entre o erro quadrático médio e a variância dos dados observados:

$$EF = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (4.6)$$

Se o quadrado das diferenças entre os valores simulados pelo modelo e os observados for tão grande quanto a variabilidade dos dados observados, então EF tende para 0.0 e a média dos valores observados (\bar{O}) é um preditor tão bom quanto o modelo, enquanto valores negativos indicam que \bar{O} é um preditor ainda melhor do que o modelo (Legates e McCabe, 1999). EF pode variar entre $-\infty$ e 1.

- O índice de concordância (adimensional):

$$d_{IA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N \left(|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}| \right)^2} \quad (4.7)$$

Este índice corresponde ao rácio entre o erro quadrático médio e o ‘erro potencial’, definido como a soma do quadrado da soma das diferenças absolutas entre P_i e \bar{O} , e O_i e \bar{O} . d_{IA} representa o maior valor relativo que pode ocorrer para cada par de valores observado e simulado (Legates e McCabe, 1999; Moriasi et al., 2007). O máximo e melhor valor para d_{IA} é 1.0.

4.2.3. Modelação da evapotranspiração com o modelo SIMDualKc

Tal como descrito em 3.1, a aproximação dos K_c duais implementada no modelo SIMDualKc para o cálculo da evapotranspiração cultural (ET_c) diária, considera separadamente as componentes transpiração das culturas (T_c) e evaporação do solo (E_s). A ET_c actual, que difere da ET_c potencial aquando da ocorrência de períodos de stresse-hídrico, é então definida por:

$$ET_{c\ act} = (K_s K_{cb} + K_e) ET_o \quad (4.1)$$

Onde $ET_{c\ act}$ é a evapotranspiração cultural actual [mm d^{-1}], K_{cb} o coeficiente de base [], K_s o coeficiente de stresse hídrico [], K_e o coeficiente de evaporação do solo [] e ET_o a evapotranspiração da cultura de referência [mm d^{-1}].

Neste estudo, e dado existir uma cobertura vegetal activa (CVA) nas entrelinhas de um dos pomares analisados que também contribui para a ET total do pomar, o K_{cb} conjugado da cultura e da CVA ($K_{cb\ crop + cover}$) é dado por (Figs. 3.3 e 3.12, Capítulo 3):

$$K_{cb\ crop+cover} = K_{cb\ cover} + K_{d\ crop} \left(\text{Max} \left[K_{cb\ crop\ full} - K_{cb\ cover}, \frac{K_{cb\ crop\ full} - K_{cb\ cover}}{2} \right] \right) \quad (4.2)$$

onde $K_{cb\ cover}$ é o K_{cb} da CVA, $K_{cb\ crop\ full}$ é o K_{cb} da cultura em condições de cobertura total do solo e $K_{d\ crop}$ é o coeficiente de densidade da cultura.

Na Eq. 4.2, o valor de $K_{cb\ crop\ full}$ é calculado em função da altura da cultura (h_{crop}) e de um factor de ajustamento estomático (F_r) (Figs. 3.3 e 3.12, Capítulo 3), enquanto que $K_{d\ crop}$ é dado por:

$$K_{d\ crop} = \min \left(1, M_L f_{c\ crop}, f_{c\ crop} \left(\frac{1}{1+h_{crop}} \right) \right) \quad (4.3)$$

Onde $f_{c\ crop}$ é a fracção de cobertura do solo pela cultura, M_L é um factor multiplicativo da $f_{c\ crop}$ destinado a impôr um ‘tecto’ na ET_c máxima por unidade de solo coberto, e h_{crop} é a altura da cultura.

No presente estudo a $f_{c\ crop}$ na Eq. 4.3 foi substituída pela fracção da radiação fotossinteticamente activa (f_{PAR}), uma vez que foi esta última que foi medida e porque existe compatibilidade entre os dois conceitos e os seus valores são próximos. O valor de $K_{cb\ cover}$ na Eq. 4.2 é calculado seguindo os passos da Fig. 3.12 do Capítulo 3, que incluem a estimação do K_{cb} da CVA em condições de cobertura total do solo ($K_{cb\ gcover\ full}$), do valor mínimo de K_c para solo não vegetado ($K_{c\ min}$), variando 0-0.15 consoante a frequência da precipitação e da

rega, e do coeficiente de densidade da CVA ($K_{d\ gcover}$), função da densidade da CVA, da fracção da superfície do solo onde esta está presente ($f_{r\ gcover}$) e da sua altura (h_{gcover}).

Balanço hídrico do solo

Tal como explicado no ponto 3.2.6 (Capítulo 3), o SIMDualKc calcula o balanço hídrico do solo na zona radicular das culturas, considerando a evolução temporal da profundidade radicular. O modelo não só estima os valores diários da ASW para a profundidade radicular actual ($Z_{r\ act}$), como também para a profundidade radicular máxima ($Z_{r\ máx}$) que as culturas atingirão, uma vez que seja especificado o teor de humidade do solo abaixo da profundidade radicular mínima no início da simulação. Assim, o solo não enraizado entre $Z_{r\ máx}$ e $Z_{r\ act}$ funciona como um reservatório para a água gravitacional que drena abaixo de $Z_{r\ act}$ e que poderá ser utilizada à medida que as raízes se vão aprofundando; por outro lado, excedendo-se a sua máxima capacidade de armazenamento, ele próprio perderá por percolação profunda, abaixo de $Z_{r\ máx}$, a água gravitacional proveniente de níveis superiores da zona radicular.

4.3. Aplicação a um pomar de pereira ‘Rocha’

4.3.1. Caracterização do local e do dispositivo experimental

A instalação do dispositivo experimental e a prossecução das observações de campo realizaram-se numa parcela de 25 hectares de pereira da variedade ‘Rocha’ localizada na freguesia da Freiria, concelho de Torres Vedras (39° 01’ 50’’ N, 09° 18’ 20’’ O) (Fig. 4.4).

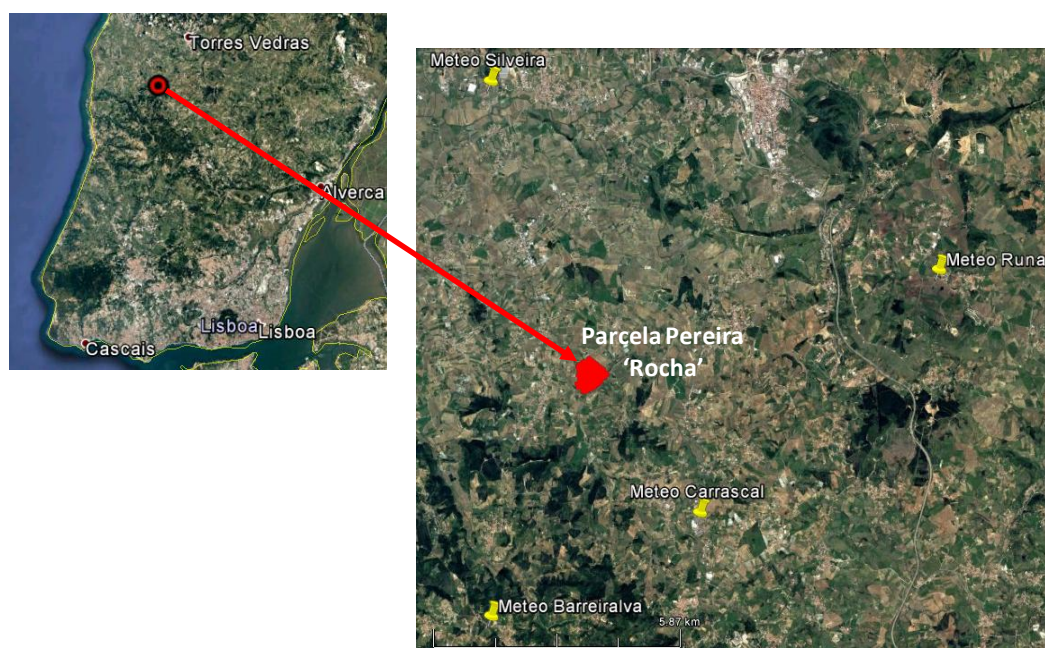


Fig. 4.4. Localização parcela de pereira ‘Rocha’ onde foram realizados os ensaios e estações meteorológicas circundantes.

O clima na região é do tipo Csb segundo a classificação de Koppen (Kottek et al., 2006), com inverno chuvoso e verão não muito quente e seco. Na Fig. 4.5 apresentam-se para o período de 01-01 a 31-10 de 2013 e 2014, os valores diários de $T_{\text{máx}}$, $T_{\text{mín}}$, $HR_{\text{máx}}$, $HR_{\text{mín}}$, R_s e P calculados para a parcela em estudo por interpolação espacial (através do método do inverso da distância) dos valores dessas mesmas variáveis registrados em quatro estações meteorológicas localizadas a menos de 8500 metros de distância (Fig. 4.4). Na figura também consta a ET_o estimada para a parcela, embora esta tenha sido calculada primeiro para cada estação (pelo método FAO-PM, utilizando as variáveis mencionadas atrás) e só depois interpolada para a parcela.

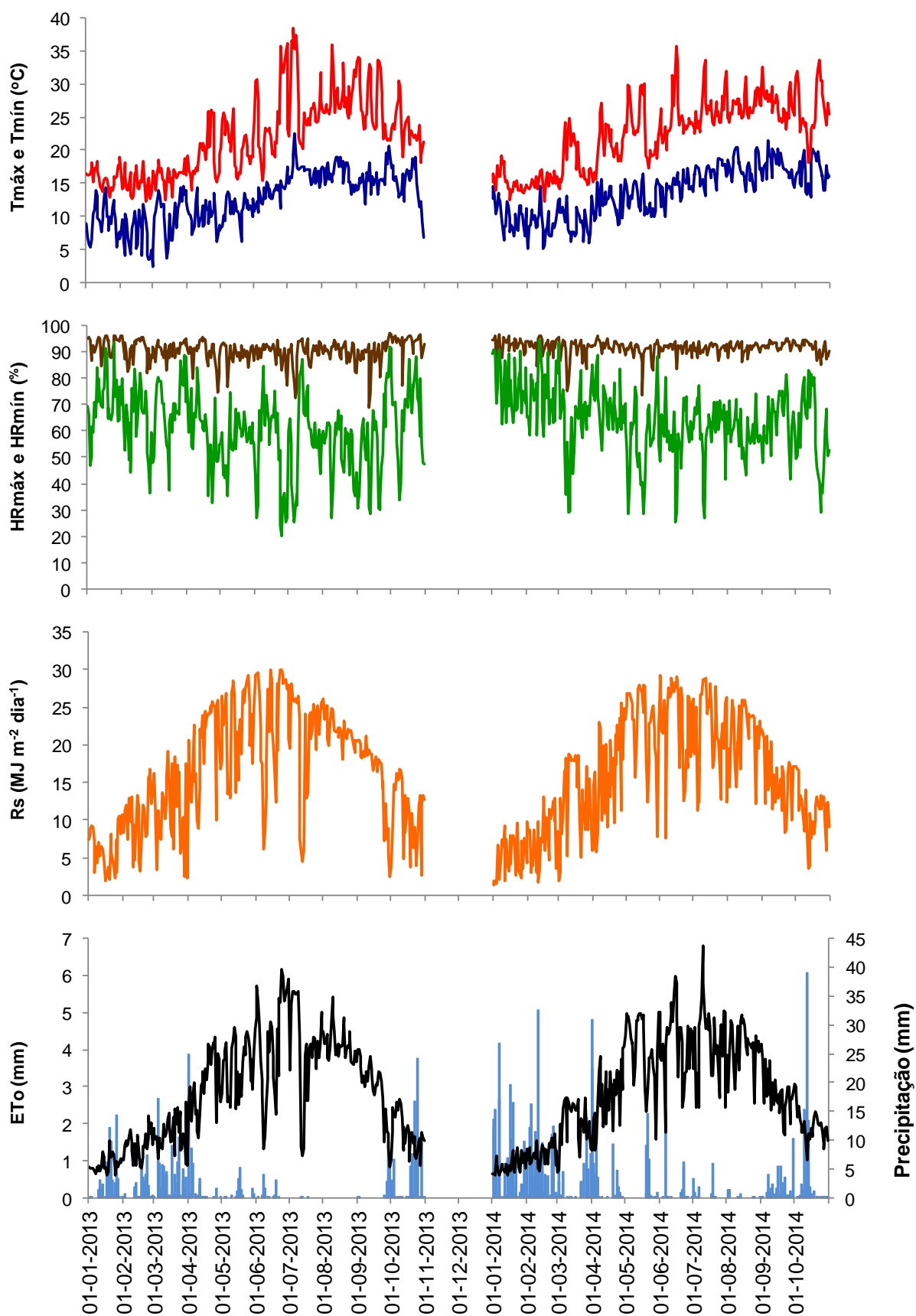


Fig. 4.5. Valores diários de $T_{\text{máx}}$ (—), $T_{\text{mín}}$ (—), $HR_{\text{máx}}$ (—), $HR_{\text{mín}}$ (—), R_s (—), ET_o (—) e precipitação (—) em 2013 (01-01 a 31-10) e 2014 (01-01 a 31-10).

O solo no local dos ensaios é do tipo franco-argilo-arenoso, cujas propriedades hidráulicas e texturais são apresentadas na Tabela 4.2. Estes valores foram obtidos em laboratório após a colheita de amostras de solo perturbadas e não perturbadas numa zona próximo do dispositivo experimental. A máxima disponibilidade de água no solo (TAW) é de 128 mm m^{-1} , calculada com base nos teores de água à capacidade de campo (θ_{CC}) e no coeficiente de emurchecimento (θ_{CE}), e atendendo à espessura da camada a que dizem respeito.

Tabela 4.2. Propriedades hidráulicas e texturais do solo na parcela de pereira ‘Rocha’ em Freiria, Torres vedras

Camada (m)	Areia grossa (%)	Areia fina (%)	Limo (%)	Argila (%)	θ_s ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	θ_{CC} ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	θ_{CE} ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
0.0-0.10	23.9	41.3	14.0	20.8	0.352	0.309	0.168
0.10-0.20	22.4	40.6	14.6	22.5	0.353	0.293	0.166
0.20-0.30	22.4	42.3	13.5	21.8	0.350	0.301	0.173
0.30-0.40	21.2	41.0	14.0	23.8	0.354	0.296	0.185
0.40-0.60	21.9	42.8	13.8	21.5	0.342	0.299	0.175
0.60-0.80	24.9	43.3	12.4	19.4	0.344	0.304	0.161
0.80-1.00	13.2	40.3	14.3	32.3	0.373	0.356	0.235

A parcela de pereira ‘Rocha’ é um pomar adulto, com um compasso de 4 x 2 metros, conduzido em eixo vertical estreito e regado por gota-a-gota com um único ramal porta gotejadores em cada linha de árvores. Os gotejadores encontram-se espaçados de 1.0 m, i.e., com 2 gotejadores por árvore, cujo débito é de 4 l h^{-1} . A uniformidade de distribuição do sistema (Pereira, 2004) foi de 96%, calculada a partir de medições de caudal a meio do ramal e nos terços mais e menos favoráveis deste. A dotação de rega (mm) variou 3.0-7.0 mm em 2013 e 2.0-6.0 mm em 2014 (Fig. 4.13), calculada multiplicando a taxa de aplicação (mm h^{-1}) dos gotejadores pelos tempos de rega (h) fornecidos pelo produtor.

As datas de alguns estádios fenológicos e de desenvolvimento da cultura para os anos de 2013 e 2014 apresentam-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Estádios fenológicos/desenvolvimento da Pereira ‘Rocha’ na parcela estudada.

Estádios de desenvolvimento	2013	2014
Abrolhamento	20-03	13-03
Plena floração	10-04	06-04
Máxima cobertura	12-06	10-06
Colheita	03-09	20-08
Fim da rega	16-09	31-08

A profundidade radicular foi inspeccionada no início e no fim do período de medições do SWC em árvores localizadas entre as duas réplicas do dispositivo experimental. Em 2013, à data da primeira medição do SWC, e em 2014 cerca de um mês após o início desta, escavaram-se trincheiras até à profundidade da toalha freática (D_{WT}), respectivamente, até 0.55 m e 0.45 m de profundidade, apanhando as fracções do solo habitualmente humedecidas e não humedecidas pela rega. Em ambos os anos verificou-se que nas paredes das trincheiras as raízes finas (de diâmetro $< 2\text{mm}$) se estendiam pelo menos até ao nível da toalha freática, apresentando uma maior densidade na fracção humedecida pela rega do que na zona não humedecida imediatamente após a projecção vertical da copa. No final do período de medições foram novamente escavadas trincheiras até 50 cm de profundidade, e utilizando uma sonda de trado, colheram-se amostras de solo de 15 em 15 cm desde o fundo da trincheira até 1.5 metros de profundidade (relativamente à superfície do solo) e em ambas as zonas humedecidas e não humedecidas pela rega, com duas repetições em cada uma. As amostras foram embaladas, etiquetadas e posteriormente levadas para o Instituto Superior de Agronomia (ISA), onde foram dispostas numa peneira com malha de 2 mm e lavadas com água até as partículas mais finas do solo desaparecerem. Em 2013, verificou-se em ambas as repetições da amostra, a ausência de raízes finas na peneira para profundidades abaixo de 1.0 m na zona humedecida e de 1.2 m na zona não humedecida, enquanto que em 2014, um ano com uma primavera bastante mais chuvosa, não se detectaram raízes abaixo de 0.8 m e 1.0 m, respectivamente, na zona humedecida e não humedecida. Também se verificou em ambos os anos um decréscimo acentuado da densidade de raízes finas a partir dos 60 cm na zona humedecida, enquanto que na não humedecida a distribuição da densidade das raízes com a profundidade foi mais uniforme, principalmente em 2013. Assim, tendo em conta o exposto atrás e para efeitos de balanço hídrico, assumiu-se que a $Z_{r\text{ máx}}$ efectiva rondaria os 1.0 m em 2013 e 0.8 m em 2014. No entanto como a sonda apenas alcança os 0.9 metros considerou-se em ambos os anos $Z_{r\text{ máx}} = 0.9\text{ m}$. Também para efeitos do cálculo do balanço hídrico do solo, assumiu-se logo à partida $Z_{r\text{ act}} = Z_{r\text{ máx}}$, e assim, uma vez que o modelo impede que o aprofundamento radicular ultrapasse a D_{WT} , resultou em que $Z_{r\text{ act}} = D_{WT}$ enquanto $D_{WT} \leq Z_{r\text{ máx}}$ e $Z_{r\text{ act}} = Z_{r\text{ máx}}$ quando $D_{WT} > Z_{r\text{ máx}}$.

A fracção da radiação fotossinteticamente activa (PAR) interceptada pela cultura (f_{PAR}) ao longo dos ciclos de desenvolvimento em 2013 e 2014, medida nas duas árvores anexas a cada réplica do dispositivo experimental apresenta-se na Fig. 4.6. A f_{PAR} foi medida com um ceptómetro *AccuPAR LP-80* (*Decagon Devices*), tendo-se adoptado o seguinte esquema: 1)

medições de 20 em 20 cm ao longo da linha de árvores, de cada um dos lados do tronco da árvore alvo até metade da distância entre esta e as que a ladeiam com o ceptómetro orientado perpendicularmente à linha e centrado no tronco; 2) medições de 20 em 20 cm ao longo de cada uma das entrelinhas opostas, desde o tronco da árvore alvo até ao meio daquelas, com o ceptómetro orientado paralelamente à linha e centrado no tronco.

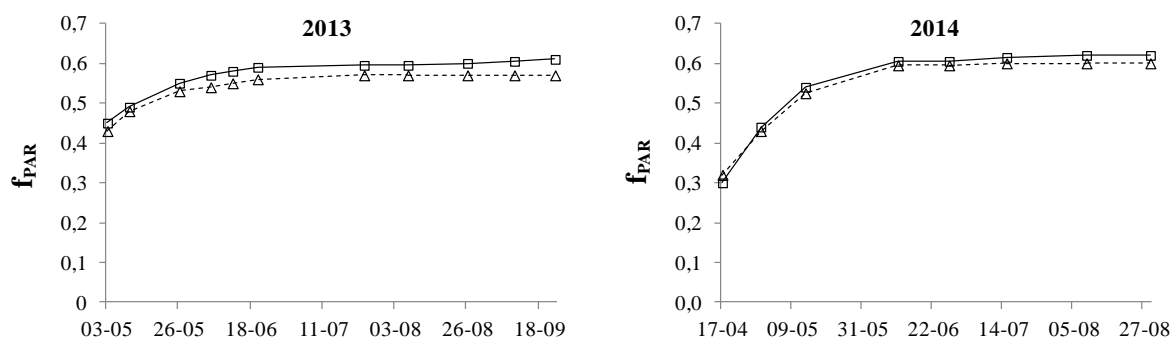


Fig. 4.6. Evolução da f_{PAR} da cultura da pereira ‘Rocha’ ao longo dos períodos de medições de 2013 e 2014 nas duas árvores anexas à réplica 1 (——, □) e à réplica 2 (-----, △) do dispositivo experimental.

O teor de água do solo (SWC) ao longo das estações de desenvolvimento de 2013 e 2014 foi medido com uma sonda *Diviner 2000*, que foi calibrada para o solo do local. A calibração consistiu em: 1) leituras da sonda efectuadas no ar e na água; 2) instalação de tubos de acesso no solo em situação de solo seco, intermédio e muito húmido; 3) leituras com a sonda de 10 em 10 cm até á profundidade máxima de 90 cm para cada uma das condições de humidade do solo; 4) colheita de amostras não perturbadas (3 repetições), de 10 em 10 cm até 90 cm, junto ao tubo de acesso, logo após as medições com a sonda; 5) pesagem das amostras colhidas após secagem em estufa a 105°C durante 48 horas; 6) cálculo do teor de humidade das amostras colhidas; 7) Disposição dos pares de valores do SWC obtidos por gravimetria e registados pela sonda para as três condições de humidade do solo num diagrama de dispersão e ajustamento de um modelo aos dados. Na Fig. 4.7, apresenta-se o modelo linear utilizado para converter os dados ‘brutos’ das leituras da sonda em teor de água do solo (SWC).

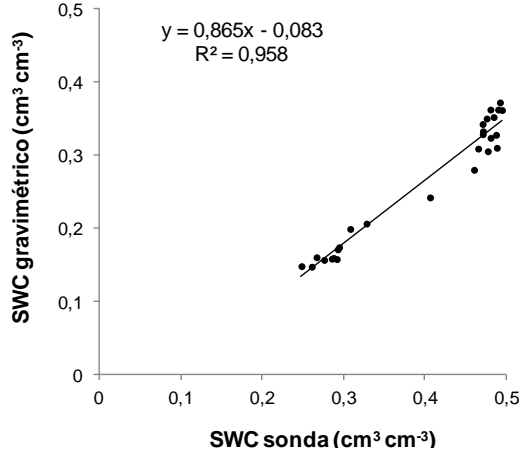


Fig. 4.7. Modelo linear ajustado aos pares de valores SWC-gravimétrico vs SWC-sonda, utilizado para a calibração das leituras da sonda no pomar de pereira ‘Rocha’.

O dispositivo experimental utilizado para a monitorização do SWC apresenta-se na Fig. 4.8, tendo sido desenvolvido por forma a capturar a heterogeneidade na distribuição horizontal e vertical do SWC e das raízes. O dispositivo consiste em 2 filas paralelas de 4 tubos cada, perpendiculares à linha de árvores, a primeira no alinhamento do gotejador e a segunda colocada a 50 cm da primeira, alinhada perpendicularmente com a metade do espaçamento entre gotejadores. Em cada uma das filas, o primeiro tubo foi inserido próximo do local da “queda” das gotas, o segundo espaçado de 40 cm daquele e o terceiro a 40 cm do segundo, no limite da projecção vertical da copa das árvores, e o quarto a 80 cm do terceiro, aproximadamente a meio da entrelinha. Foram instaladas duas réplicas do dispositivo na mesma linha de árvores, distando uma da outra 16 metros com o objectivo de aumentar a confiança das predições do SWC pelo o modelo. Na Fig. 4.8 pode ainda observar-se que os dois gotejadores afectos a cada árvore (de um lado e do outro) não se encontram à mesma distância do tronco, estando um a 35 cm deste e o outro a 65 cm.

A média ponderada do SWC em cada uma das duas fileiras de tubos foi calculada através da Eq. 4.4, que tem em atenção o peso de cada tubo na fileira, i.e., a porção do comprimento total da fileira afectada a cada tubo:

$$SWC_{fila\ i} = \frac{d_1 SWC_1 + 0.4 SWC_2 + 0.6 SWC_3 + 0.6 SWC_4}{d_1 + d_2 + d_3 + d_4} \quad (4.4)$$

onde:

fila i primeira ou segunda fileira tubos;

SWC_i teor de água do solo medido pelo tubo i ($i = 1, \dots, 4$)

- d_1 distância entre a linha de árvores e o ponto médio dos tubos 1 e 2;
- d_2 distância entre o ponto médio dos tubos 1 e 2, e o ponto médio dos tubos 2 e 3
- d_3 distância entre o ponto médio dos tubos 2 e 3, e o ponto médio dos tubos 3 e 4
- d_4 distância entre o ponto médio dos tubos 3 e 4, e o meio da entrelinha

Os valores dos comprimentos d_1 , d_2 , d_3 e d_4 estão representados a negrito na Fig. 4.8. O SWC final é calculado como a média simples do SWC das duas fileiras.

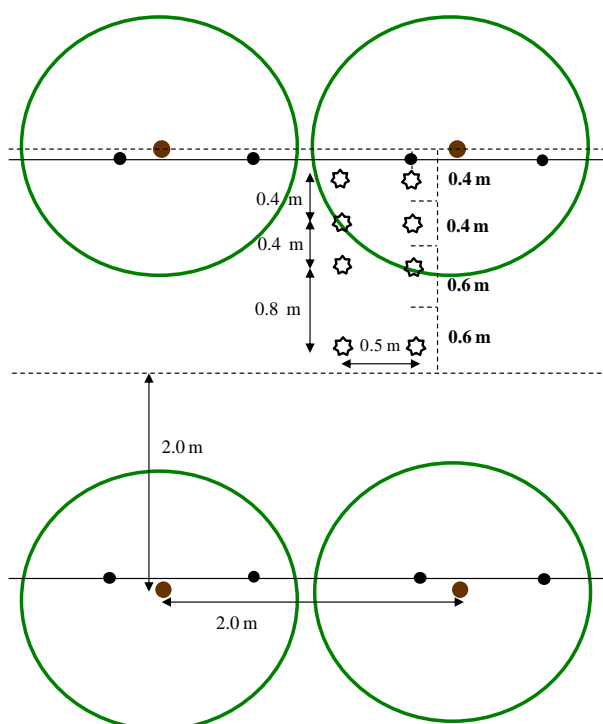


Fig. 4.8. Dispositivo experimental utilizado para a medição do teor de água no solo no pomar de pereira ‘Rocha’: tronco das árvores (●), gotejadores(●), tubos de acesso à sonda (☆); as distâncias indicadas a negrito e a letra normal junto aos tubos, referem-se, respectivamente, ao comprimento de influência de cada tubo e às distâncias entre tubos.

A profundidade da toalha freática (D_{WT}) (Fig. 4.9) foi inspeccionada nas proximidades de cada réplica do dispositivo experimental, mais concretamente na entrelinha, aquando de cada deslocação à parcela para realizar as medições do SWC. Para isso recorreu-se a uma sonda de trado para perfurar o solo até detectar o nível freático. Quando este desceu para profundidades maiores às das exploráveis pela sonda (> 1.1 m), e já numa fase com ausência de precipitação, foi escavada uma pequena trincheira com 50 cm de profundidade, cujo fundo foi perfurado e

aprofundado por forma a acompanhar a descida da toalha freática. A D_{WT} foi medida com uma fita métrica metálica e com o auxílio de uma lanterna para melhor detectar o momento do contacto entre a extremidade da fita e a água. Na Fig. 4.9 pode constatar-se que apesar dos dois locais de medição distarem apenas de 16 metros as diferenças na D_{WT} são consideráveis, e que em 2014, um ano bastante mais chuvoso, principalmente no início da primavera, a D_{WT} foi consideravelmente menor do que em 2013.

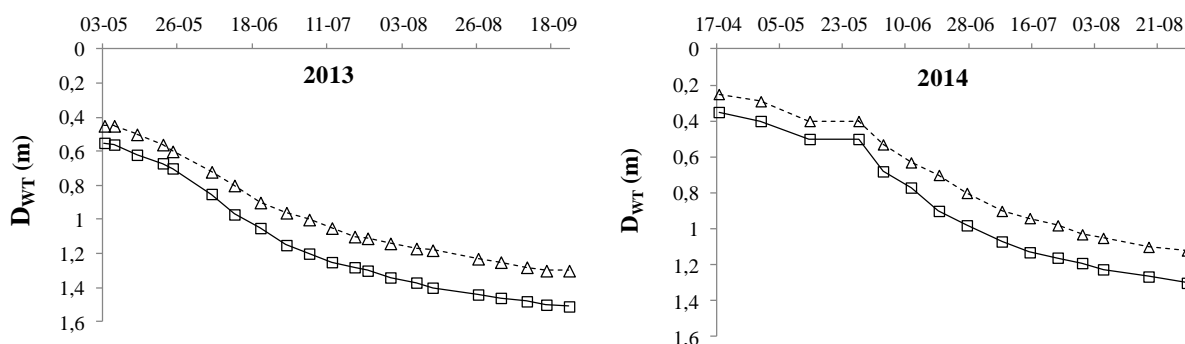


Fig. 4.9. Evolução da profundidade da toalha freática ao longo dos ciclos de desenvolvimento da pereira Rocha em 2013 e 2014 para a réplica 1 (——, \square) e réplica 2 (-----, \triangle) do dispositivo experimental.

A cobertura vegetal activa (CVA) presente na entrelinha (na linha de árvores foi controlada com herbicidas) também contribui para a ET total do pomar. Por isso avaliou-se o seu desenvolvimento em termos da sua altura, h_{gcover} , densidade, $g_{c\ dens}$ [0-1], e fracção do solo onde ela estava presente, $f_{r\ gcover}$ [0-1]. h_{gcover} foi medida com uma fita métrica metálica, $g_{c\ dens}$ foi estimada visualmente através de fotografias tiradas aquando de cada visita ao campo, enquanto $f_{r\ gcover}$ correspondeu a metade da fracção da entrelinha, i.e. $f_{r\ gcover} = 0.25$., devido à passagem das rodas do tractor. Na Fig. 4.10 apresentam-se os valores medidos de h_{gcover} , os valores estimados de $g_{c\ dens}$ e do produto desta por $f_{r\ gcover}$, por forma a obter a fracção do solo efectivamente coberto pela CVA, $f_{c\ eff\ gcover}$ (Fig. 3.12, Capítulo 3). Na figura apresentam-se também o tipo de operações utilizadas para controlar o crescimento da CVA e as respectivas datas.

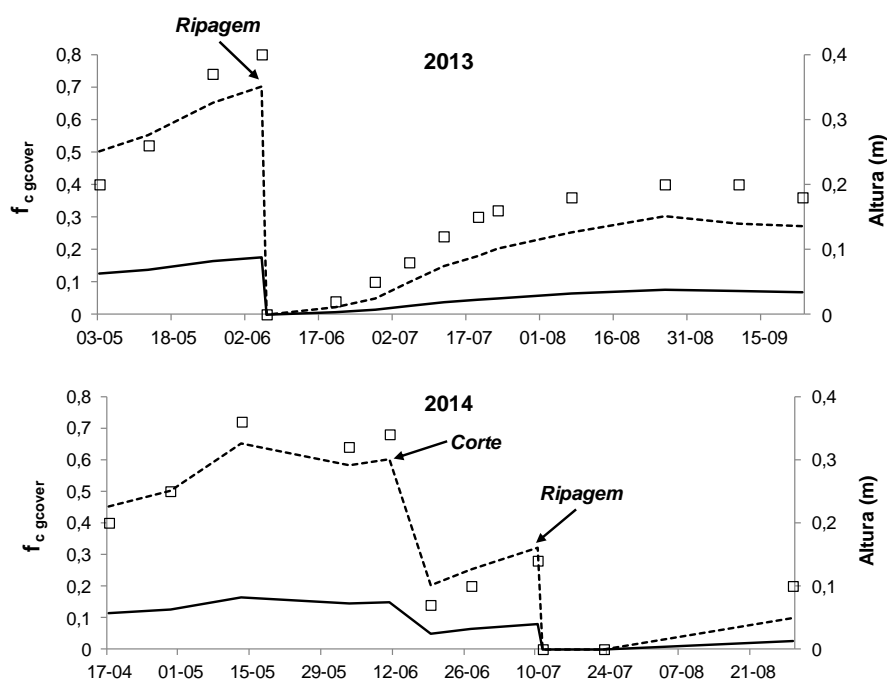


Fig. 4.10. Desenvolvimento da cobertura vegetal activa (CVA) em termos da sua altura (\square), fracção de cobertura do solo - f_{c_gcover} (-----), e f_{c_gcover} ajustada aos 25% da superfície total do solo onde a CVA está presente (—).

4.3.2. Resultados

4.3.2.1. Calibração e validação do modelo

Os valores dos parâmetros $K_{cb\ crop\ full}$ (para os estádios inicial, médio e final), M_L e da fracção de depleção da água do solo em conforto hídrico (p) propostos em Allen e Pereira (2009) e Allen et al. (1998) para a cultura da pereira, foram aplicados nas simulações iniciais com o modelo: $K_{cb\ full\ ini} = 1.15$, $K_{cb\ full\ mid} = 1.15$, $K_{cb\ full\ end} = 0.90$, $M_L = 2.0$ e $p = 0.5$ (Tabela 4.4), com $K_{c\ min} = 0.05$ tal como fundamentado em 4.2.2. Note-se que em 2014 o valor utilizado para $K_{cb\ full\ end}$ foi igual aos valores utilizados para o estágio inicial e médio. i.e., $K_{cb\ full\ end} = 1.15$, o que se deveu ao facto das medições terem terminado (a 28-08-2014) antes da fase da senescência das folhas (*late-season*), que começa no início de Setembro e onde o K_{cb} começa a decrescer lentamente (Allen et al., 1998, 2007b). Os valores padrão de $K_{cb\ crop\ full}$ foram calculados de acordo com a Fig. 3.3 do Capítulo 3, com as árvores medindo 3.7 metros de altura, i.e., com $h = 3.7$ m, e utilizando os valores do factor de ajustamento estomático (F_r) propostos em Allen e Pereira (2009) para os estádios inicial ($F_r = 0.95$), médio ($F_r = 0.95$) e final ($F_r = 0.75$). Na Tabela 4.4 apresentam-se também os valores dos K_{cb} resultantes do ajustamento dos valores padrão de $K_{cb\ crop\ full}$ às condições actuais de f_c/f_{PAR} ($K_{cb\ adj}$) à data do

início das medições, no período de máxima cobertura e no fim da campanha de rega, respectivamente, $K_{cb \text{ adj ini}} = 0.95$, $K_{cb \text{ adj mid}} = 1.04$ e $K_{cb \text{ adj end}} = 0.81$ em 2013, e 0.71, 1.05 e 1.05 em 2014. Considerou-se que o K_{cb} da CVA em condições de cobertura total do solo é semelhante ao de um relvado padrão (Allen et al., 1998), i.e.: $K_{cb \text{ gcover full}} = 1.0$. O valor inicial de TEW foi calculado como: $TEW = (\theta_{CC} - 0.5\theta_{CE}) Z_e 1000$ (Allen et al., 1998), com θ_{CC} e θ_{CE} respeitantes à camada de 0-10 cm (Tabela 4.2) e assumindo $Z_e = 0.15$ m, enquanto que para REW considerou-se o valor tabelado em Allen et al. (1998) para um solo franco, o mais próximo do solo da parcela. Assim foram utilizados inicialmente os valores: $Z_e = 0.15$ m, $TEW = 34$ mm e $REW = 10$ mm (Tabela 4.4). Os valores padrão dos parâmetros da CR que constam na Tabela 4.4 correspondem ao tipo de solo ‘modelo’ franco-argiloso especificado em Liu et al. (2006), teoricamente o mais próximo do solo franco-argilo-arenoso do local dos ensaios. Os valores dos parâmetros para o cálculo da percolação profunda, e de acordo com as instruções de Liu et al. (2006), inicializaram-se com $a_{pp} = 330 \text{ mm m}^{-1}$ e $b_{pp} = -0.0001$ (Tabela 4.4). No entanto, uma vez que existe uma toalha freática superficial, enquanto $D_{WT} \leq Z_{r \text{ max}}$ não existe percolação abaixo de $Z_{r \text{ max}}$. Assim, a especificação de um valor para a_{pp} constituiu um artifício para simular o escoamento superficial da água proveniente das chuvadas que em 2014 ocorreram quando a toalha freática estava ainda muito próxima da superfície, já que o método do ‘número de curva’ não conseguiu simular este escoamento. Assim, assumiu-se que toda a água extra acima do valor de a_{pp} não se perdeu por DP mas sim por escoamento superficial. O valor extremamente baixo de b_{pp} serviu para obter uma velocidade de drenagem nula.

Com base na distribuição e na intensidade da precipitação nos 15 dias anteriores à data de início das simulações bem como à profundidade da toalha freática àquela data, assumiram-se as seguintes condições de partida para a depleção da água na camada evaporativa do solo (D_e), expressa em termos de percentagem de TEW: $D_e = 50\%$ para ambas as réplicas do dispositivo experimental em 2013, e $D_e = 30\%$ para a réplica 1 e $D_e = 0\%$ para a réplica 2 em 2014. Com base nos teores de água do solo medidos à data de início das simulações, a depleção inicial da água na zona radicular (D_r), expressa em termos de percentagem de TAW, foi: $D_r = -5\%$ para a réplica 1 e -10% para a réplica 2 em 2013, e $D_r = -10\%$ para a réplica 1 e $D_r = -15\%$ para a réplica 2 em 2014, todas as situações indicando um teor de água inicial na zona radicular acima da capacidade de campo, correspondendo possivelmente à franja capilar. Quanto à depleção da água do solo abaixo da zona radicular à data do começo das simulações, expressa também em termos da percentagem de TAW, foi de -20% para todos os casos, já que

representa o teor de água na zona saturada do solo devido à presença da toalha freática superficial.

Tabela 4.4. Valores iniciais (padrão) e calibrados dos parâmetros da cultura da pereira ‘Rocha’ necessários ao cálculo do K_{cb} para as condições actuais de densidade, da sensibilidade da cultura ao stress hídrico, do valor do K_{cb} da CVA em condições de cobertura total do solo, dos parâmetros da evaporação do solo e dos parâmetros da ascensão capilar e da percolação profunda.

	Padrão*		Calibrados	
Cultura				
Ajustamento dos $K_{cb \text{ full}}$ de acordo com a f_c (ou f_{PAR})				
Ano	2013	2014	2013	2014
$K_{cb \text{ full ini}}$		1.15		1.05
$K_{cb \text{ full mid}}$		1.15		1.05
$K_{cb \text{ full end}}$	0.9	1.15	0.8	1.05
$K_{c \text{ min}}$		0.05		0.05
M_L		2.0		1.5
$K_{cb \text{ adj ini}}$	0.95	0.71	0.73	0.50
$K_{cb \text{ adj mid}}$	1.04	1.05	0.95	0.96
$K_{cb \text{ adj end}}$	0.81	1.05	0.72	0.96
Sensibilidade da cultura ao stress hídrico				
p (comum a todas as fases do desenvolvimento)		0.5		0.5
Cobertura vegetal activa				
$K_{cb \text{ gcover full}}$		1.0		1.0
Solo				
Z_e (m)		0.15		0.1
TEW (mm)		33		25
REW (mm)		10		10
Ascensão capilar				
a_1 (mm m ⁻¹)		312		312
b_1		-0.32		-0.16
a_2 (mm m ⁻¹)		275		285
b_2		-0.16		-0.54
a_3		-1.4		-0.15
b_3		6.8		2.1
a_4		1.11		7.55
b_4		-0.98		-2.03
Percolação profunda				
a_{PP} (mm m ⁻¹)		330		340
b_{PP}		-0.0005		-0.0005

* Provenientes de Allen et al., (1998, 2005b), Allen e Pereira (2009) e Liu et al., (2006).

A calibração dos valores padrão dos parâmetros referidos anteriormente de acordo com o procedimento exposto no ponto 4.2.2., resultou em algumas diferenças: em 2013 o $K_{cb\ full}$ foi reduzido de 1.15 para 1.05 no período inicial e médio, e de 0.9 para 0.8 no final, enquanto em 2014 a redução de $K_{cb\ full}$ foi de 1.15 para 1.05 para todas as fases referidas (devido às razões apresentadas atrás); M_L foi reduzido de 2.0 para 1.5; p não sofreu ajustamentos; o parâmetro a_2 do cálculo da CR foi aumentado de $275\ mm\ m^{-1}$ para $285\ mm\ m^{-1}$; os parâmetros a_{pp} e b_{pp} do cálculo da DP, foram ajustados, respectivamente, de $330\ mm\ m^{-1}$ para $340\ mm\ m^{-1}$, e de -0.0173 para -0.0001 ; Z_e foi reduzida de 0.15 m para 0.1 m, o que resultou numa redução de TEW de 33 mm para 25 mm, enquanto REW manteve o valor inicial (10 mm). A redução, aquando da calibração, dos valores iniciais (padrão) de $K_{cb\ full\ ini}$, $K_{cb\ full\ mid}$, $K_{cb\ full\ end}$ e M_L , fez com que aqueles primeiros três valores quando ajustados às condições reais de f_c , i.e., $K_{cb\ adj\ ini}$, $K_{cb\ adj\ mid}$ e $K_{cb\ adj\ end}$ (Tabela 4.4), fossem também reduzidos relativamente aos seus homólogos padrão, com $K_{cb\ adj\ ini} = 0.73$, $K_{cb\ adj\ mid} = 0.95$ e $K_{cb\ adj\ end} = 0.72$ em 2013, e 0.5, 0.96 e 0.96 em 2014.

Os valores de $K_{cb\ adj\ mid}$ obtidos neste estudo são bastante maiores do que os $K_c \approx 0.5$ obtidos por Conceição et al. (2008) com o método das flutuações instantâneas, para a mesma cultura e numa região geograficamente próxima. Valores da $f_c \approx 0.35$ nesse pomar comparados com a $f_c \approx 0.60$ do pomar do presente estudo podem explicar em parte as grandes diferenças obtidas, bem como a elevada expansão horizontal do sistema radicular devido à baixa profundidade da toalha freática. Contrariamente os valores aqui obtidos são muito próximos dos valores máximos (durante o verão) de $K_{cb} \approx 1.0$ obtidos por Kang et al. (2003) através de medições do fluxo de seiva (método dos impulsos de calor) num pomar adulto regado por alagamento na Austrália.

Os valores simulados e observados da água disponível no solo (ASW, mm) nos anos de 2013 e 2014 para as duas réplicas do dispositivo experimental são apresentados na Fig. 4.11. Os valores da ASW em 2013 para a réplica 1, utilizados para a calibração do modelo, correspondem à Fig. 2a, enquanto que os restantes casos correspondem à validação do modelo em 2013 (Fig. 2b) e em 2014 (Figs. 2c e 2d). A figura mostra que a ASW medida apresentou uma amplitude de variação considerável e que existem diferenças significativas entre as duas réplicas, com a ASW da réplica 2 mantendo-se persistentemente e consideravelmente acima da ASW da réplica 1. Isto deveu-se essencialmente à menor D_{WT} junto à réplica 2, que permaneceu consistentemente 0.2-0.3 metros acima da D_{WT} junto à réplica 1. Pode constatar-se que, em geral, as previsões da ASW pelo modelo revelam uma boa aderência à ASW

medida, verificando-se, no entanto, que os valores simulados da ASW para réplica 1, tanto no ano de 2013 como no de 2014, seguem mais de perto a ASW medida do que na réplica 2, onde houve uma ligeira subestimação desta última no último terço da estação de crescimento.

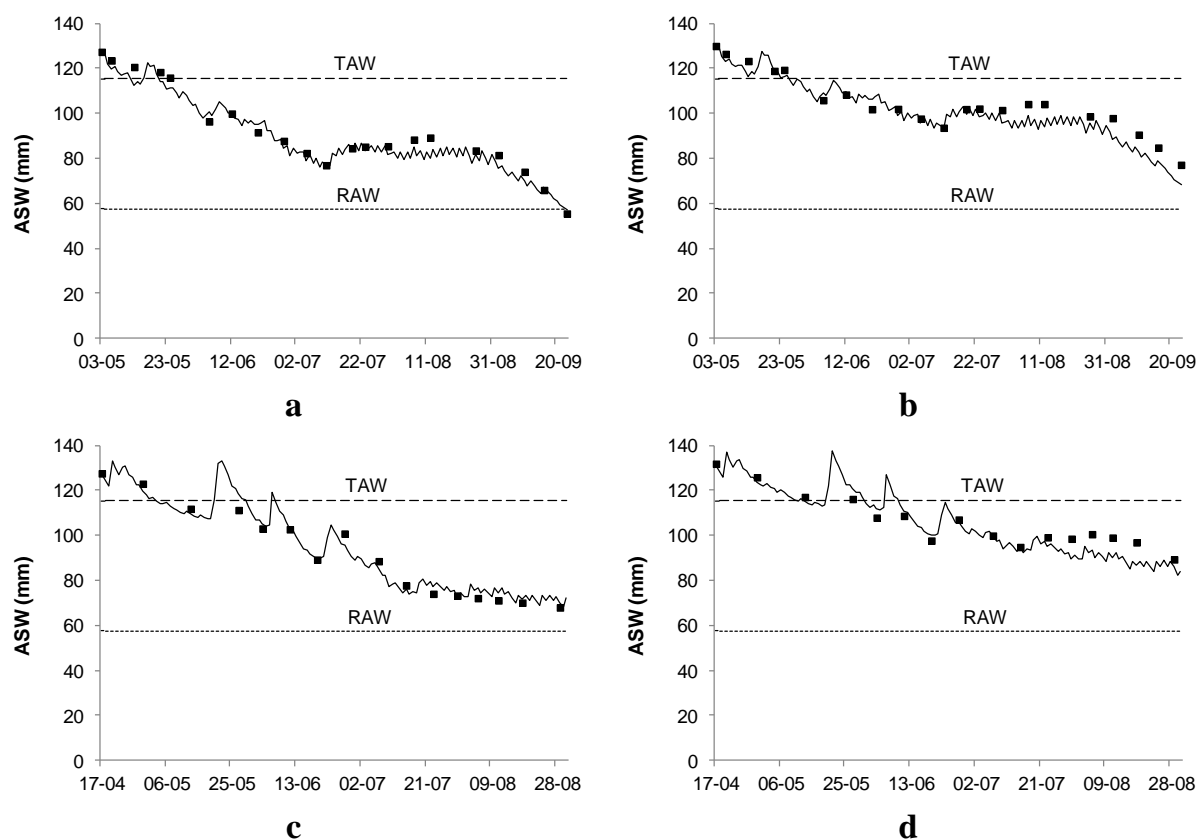


Fig. 4.11. Valores da ASW medidos e simulados pelo modelo calibrado ao longo das estações de desenvolvimento da cultura da pereira ‘Rocha’: a) réplica 1 do dispositivo experimental em 2013; b) réplica 2 em 2013; c) réplica 1 em 2014; e d) réplica 2 em 2014

Os indicadores da qualidade do ajustamento apresentam-se na Tabela 4.5. O coeficiente da regressão forçada à origem (b_0) foi próximo de 1.0 para os quatro casos, mostrando que os valores simulados da ASW estiveram estatisticamente próximos dos valores observados. Os coeficientes de determinação (R^2) variaram entre 0.91 a 0.97, indicando que uma grande percentagem da variabilidade total dos dados observados foi explicada pelo modelo. Os valores de RMSE foram inferiores a 5.5 mm, representando menos de cerca de 5% de TAW; o AAE e o ARE foram inferiores a 5 mm, com EF a variar de 0.84 a 0.97 e $d_{IA} \geq 0.96$ para os quatro casos. Ao analisar todos os casos em conjunto: $b_0 = 0.98$ e $R^2 = 0.95$ (Fig. 3), RMSE e AAE foram baixos, respectivamente, 4.5 e 3.6 mm, e os valores de EF e d_{IA} , respectivamente, 0.93 e 0.98, foram bastante elevados (Tabela 4.5). Em resumo, os resultados indicam o bom desempenho do SIMDualKc quanto à previsão dos valores da ASW para a cultura da pereira ‘Rocha’ utilizando a aproximação dos K_c duais, com a estimação dos K_{cb} a partir da f_c/f_{PAR} e

da h_{crop} , em dois anos com características climáticas diferentes e diferentes condições quanto à contribuição das águas subterrâneas para a ET_c .

Tabela 4.5. Indicadores da qualidade do ajustamento entre os valores da ASW medida e simulada pelo modelo para a cultura da Pereira ‘Rocha’.

Indicadores da qualidade do ajustamento	b	R^2	$RMSE$ (mm)	$RMSE/TAW$ (%)	ARE (%)	AAE (mm)	EF	d_{IA}
Réplica 1 2013 (Calibração)	0.97	0.97	4.1	3.6	3.6	3.3	0.95	0.99
Réplica 2 2013 (Validação)	0.97	0.93	5.3	4.6	4.4	4.4	0.84	0.96
Réplica 1 2014 (Validação)	1.00	0.97	3.2	2.8	2.9	2.6	0.97	0.99
Réplica 2 2014 (Validação)	0.98	0.91	5.1	4.4	3.9	3.9	0.80	0.96
Conjunto dos ensaios	0.98	0.95	4.5	3.9	3.7	3.6	0.93	0.98

4.3.2.2. Curvas dos coeficientes culturais: K_{cb} , $K_{cb\ act}$, K_e

A transpiração total do pomar é constituída pela T da cultura e pela T da CVA, tendo-se constatado no entanto uma contribuição diminuta desta última para a T total do pomar, tal como pode ser observado na Fig. 4.12, em termos dos valores de $K_{cb\ crop+gcover}$, $K_{cb\ crop}$ e $K_{cb\ gcover}$ (consultar Figs. 3.3 e 3.12, Capítulo 3). Isto deveu-se à reduzida fracção da superfície do solo ocupada pela CVA ($f_{r\ gcover} \approx 0.25$), à intercepção da grande maioria da radiação solar pelas pereiras e à existência de uma elevada resistência aerodinâmica ao nível do solo na entrelinha, factores que estão implícitos no coeficiente de densidade da cultura ($K_{d\ crop}$) (Eq 4.3). Assim, apenas num período inicial em que a f_c da cultura era ainda reduzida, sobretudo em 2014, onde as simulações começaram pouco depois da plena floração das pereiras (em 2013 as simulações começaram numa fase já mais avançada, com f_c mais elevada), $K_{cb\ crop+gcover}$ foi superior a $K_{cb\ crop}$, sendo a diferença entre os dois esbatida à medida que a f_c da cultura aumentou e o desenvolvimento da CVA foi controlado por intermédio de operações de corte e ripagem.

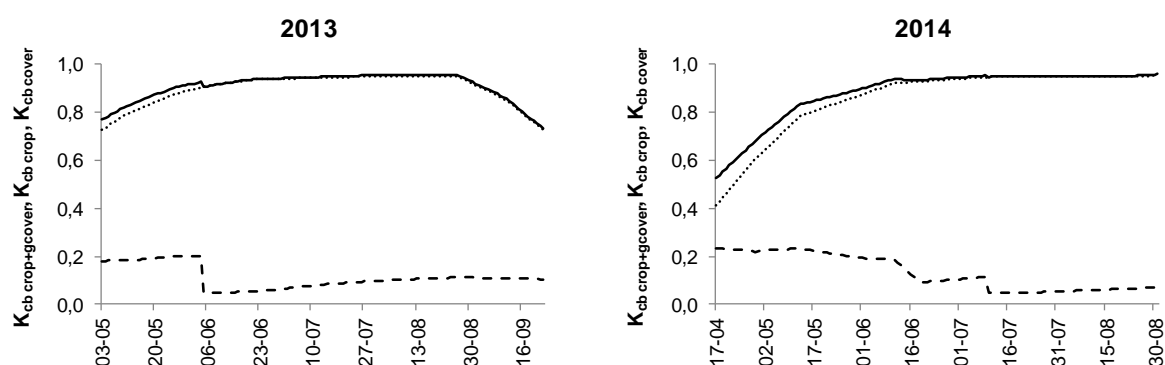


Fig. 4.12. Evolução dos valores de $K_{cb\ crop}$ (.....), $K_{cb\ gcover}$ (- - - -) e $K_{cb\ crop+gcover}$ (——) ao longo das estações de desenvolvimento da pereira ‘Rocha’ em 2013 e 2014.

As séries temporais de $K_{cb \text{ crop} + \text{gcover}}$, doravante designadas apenas por K_{cb} , de K_e e do K_{cb} ajustado ao stresse hídrico ($K_{cb \text{ adj}} = K_s K_{cb}$), da precipitação e da rega ao longo das estações de 2013 e 2014 são apresentados na Fig. 4.13 para a réplica 1 do dispositivo experimental. Em ambos os casos pode constatar-se que os valores mais elevados de K_e ocorrem em resposta à precipitação, em 2013 concentrada apenas no período inicial e em 2014 mais distribuída ao longo de todo o período analisado, embora mais intensa na primeira metade. Durante o período de máxima f_c , o K_e manteve-se a um nível baixo (≈ 0.07) e praticamente constante em 2013, em concordância com a ausência de precipitação, elevada frequência da rega e baixa fracção da superfície do solo humedecida pela rega (f_w), enquanto em 2014, apesar de também baixo, os seus valores apresentaram alguns pequenos ‘picos’ em resposta a pequenas precipitações ocorridas na segunda metade do período analisado. As diferenças ao nível de K_e entre 2013 e 2014 foram portanto consideráveis. A influência da variação da f_c na componente do K_e associada à rega - K_{ei} (Tabela 3.2, Capítulo 3) foi reduzida, dada a muito baixa f_w . Pelo contrário, é notório, principalmente em 2014, que o aumento da f_c desde o início dos períodos analisados até à máxima cobertura, foi acompanhado por uma redução da componente do K_e associada à precipitação K_{ep} (Tabela 3.2, Capítulo 3) para a mesma quantidade de precipitação. Os valores de $K_{cb \text{ act}}$ (coincidentes com os de $K_{cb \text{ pot}}$, uma vez que não existiu stresse hídrico) durante o período de máxima cobertura são próximos em ambos os anos, enquanto que os valores iniciais de $K_{cb \text{ act}}$ em 2014 são mais baixos do que em 2013, uma vez que a simulação em 2014 começou mais cedo (em 17-04) do que em 2013 (03-05), e portanto com uma f_c mais baixa, respectivamente, $f_c = 0.3$ contra $f_c = 0.45$. Por outro lado, os valores de $K_{cb \text{ act}}$ na parte final das estações de crescimento são mais baixos em 2013 do que em 2014, uma vez que em 2013 o período analisado estendeu-se até ao fim do mês de Setembro, no início do qual começa a lenta fase de senescência das folhas (ou pelo menos de maior resistência estomática), enquanto que em 2014 as medições terminaram no fim de agosto, previamente ao começo daquela fase.

Estes resultados ilustraram a utilidade do modelo para melhorar a compreensão de como o consumo total de água pela cultura foi repartido entre T_c e E_s em resposta a variações da f_c ao longo do ciclo de crescimento e da frequência e intensidade da precipitação e da rega.

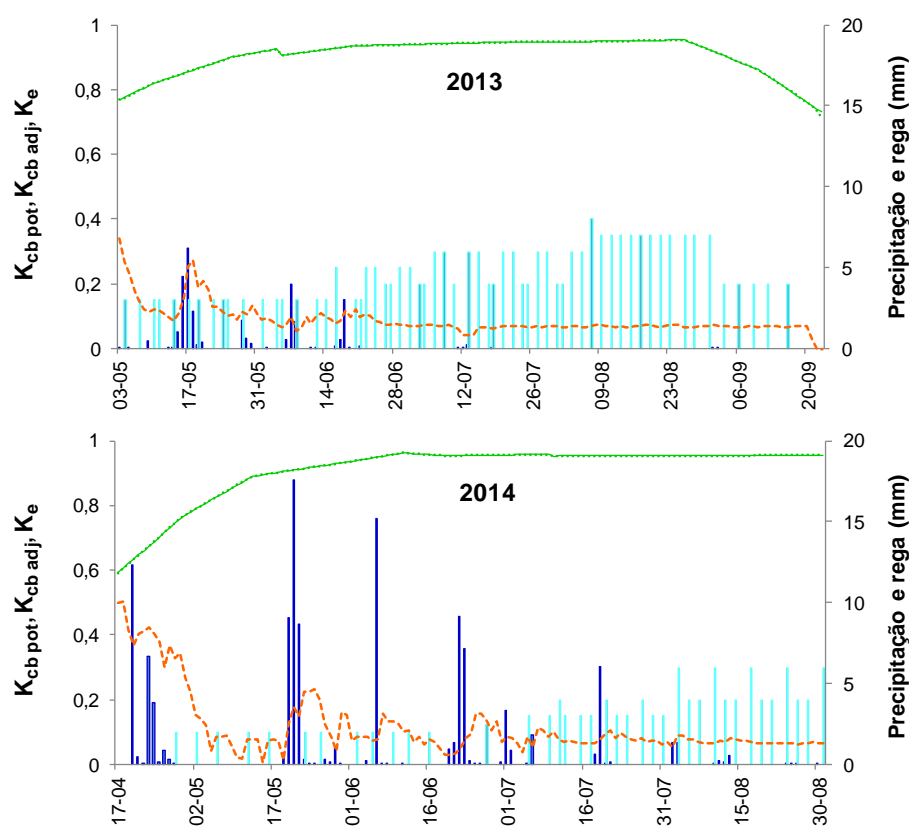


Fig. 4.13. Evolução do K_{cb} (cultura + CVA) potencial - $K_{cb\ pot}$ (—), do K_{cb} ajustado ao stress-hídrico - $K_{cb\ adj}$ (.....), do K_e (- - - -), da P (—) e da rega (—) ao longo das estações de desenvolvimento da cultura da pereira ‘Rocha’ em 2013 e 2014.

4.3.2.3. Transpiração, evaporação e uso da água

Com o objectivo de analisar o impacto da distribuição temporal da precipitação, da rega, da PFT e da f_c nos valores de CR, $ET_{c\ act}$, $T_{c\ act}$ e E_s , os períodos totais analisados em 2013 e 2014 foram divididos em duas metades, a primeira com valores mais elevados de P e do nível freático, e a segunda com valores mais elevados da rega e da f_c . Na Tabela 4.6, apresentam-se para a primeira e segunda metade dos períodos analisados de 2013 e 2014, os valores modelados de E_s (mm), T_c (mm), CR (mm) e da variação da ASW (ΔASW) (mm), bem como a precipitação e a rega para ambas as réplicas do dispositivo experimental. Os resultados mostram que na primeira metade E_s foi de 31-33 mm e 39-40 mm (réplica 1 e réplica 2), respectivamente, em 2013 e 2014, contribuindo em 11% para a ET_a da primeira metade em 2013 e em 14% em 2014 (média das duas réplicas). Esta diferença ao nível da E_s entre os dois anos deveu-se a um teor de humidade na camada evaporativa do solo persistentemente mais elevado em 2014 do que em 2013, fruto da ocorrência de uma maior quantidade de precipitação, respectivamente, 97 contra 29 mm (Tabela 4.6). Também a mais baixa f_c em

2014 durante o período inicial (Fig. 4.6) (devido ao começo da simulação numa fase mais precoce do ciclo de desenvolvimento), e logo a mais elevada energia disponível à superfície do solo para a evaporação, contribuiu para aquela diferença. Durante a segunda metade dos períodos analisados, e apesar do aumento substancial da quantidade de rega, E_s diminuiu para 7% da ET_a em 2013 e 8% da ET_a em 2014 (média das duas réplicas), fruto da diminuição drástica da precipitação (para 0.1 e 17 mm, respectivamente, em 2013 e 2014), da reduzida f_w e da elevada f_c (Tabela 4.6). Quanto à CR na primeira metade das estações de crescimento de 2013 e 2014, variou 100-108 mm em 2013 e 142-153 mm em 2014 (os valores mais altos para a réplica 2), representando 35 e 39% da ET_a em 2013, respectivamente, para as réplicas 1 e 2, e 51% (réplica 1) e 56% (réplica 2) da ET_a em 2014, assumindo um papel decisivo no consumo de água pela cultura, principalmente na réplica 2, tal como também se pode constatar na Fig. 4.14. Na segunda metade CR decresceu para 57-73 mm (o valor mais alto para a réplica 1) em 2013 e manteve-se ao mesmo nível da primeira em 2014, variando 141-146 mm (o valor mais alto para a réplica 2). Esta diferença da CR entre 2013 e 2014 é bem patente na Fig. 4.14, contribuindo em 27% (réplica 1) e 22% (réplica 2) para ET_a em 2013, e 48% (réplica 1) e 50% (réplica 2) da ET_a em 2014.

Tabela 4.6. Valores simulados da evaporação (E), transpiração (T) e ascensão capilar (CR) para o pomar de pereira ‘Rocha’ em 2013 e 2014, relativos a dois períodos do ciclo de desenvolvimento e para a totalidade do período de desenvolvimento analisado.

	P (mm)	Rega (mm)	ΔASW (mm)	CR (mm)	$T_{c\ act}$ (mm)	E_s (mm)	P (mm)	Rega (mm)	ΔASW (mm)	CR (mm)	$T_{c\ act}$ (mm)	E_s (mm)
2013												
	1ª metade (03-05 a 13-07)						2ª metade (14-07a 23-09)					
R1 ^a	29	120	46	100	258	31	0.1	171	24	73	250	18
R2 ^b	29	120	31	108	247	33	0.1	171	30	57	240	19
2014												
	1ª metade (17-04 a 24-06)						2ª metade (25-06 a 31-08)					
R1 ^a	97	24	25	142	237	39	17	104	30	141	270	22
R2 ^b	97	24	20	153	235	40	17	104	24	146	268	23

a: réplica 1 do dispositivo experimental; b: réplica 2 do dispositivo experimental

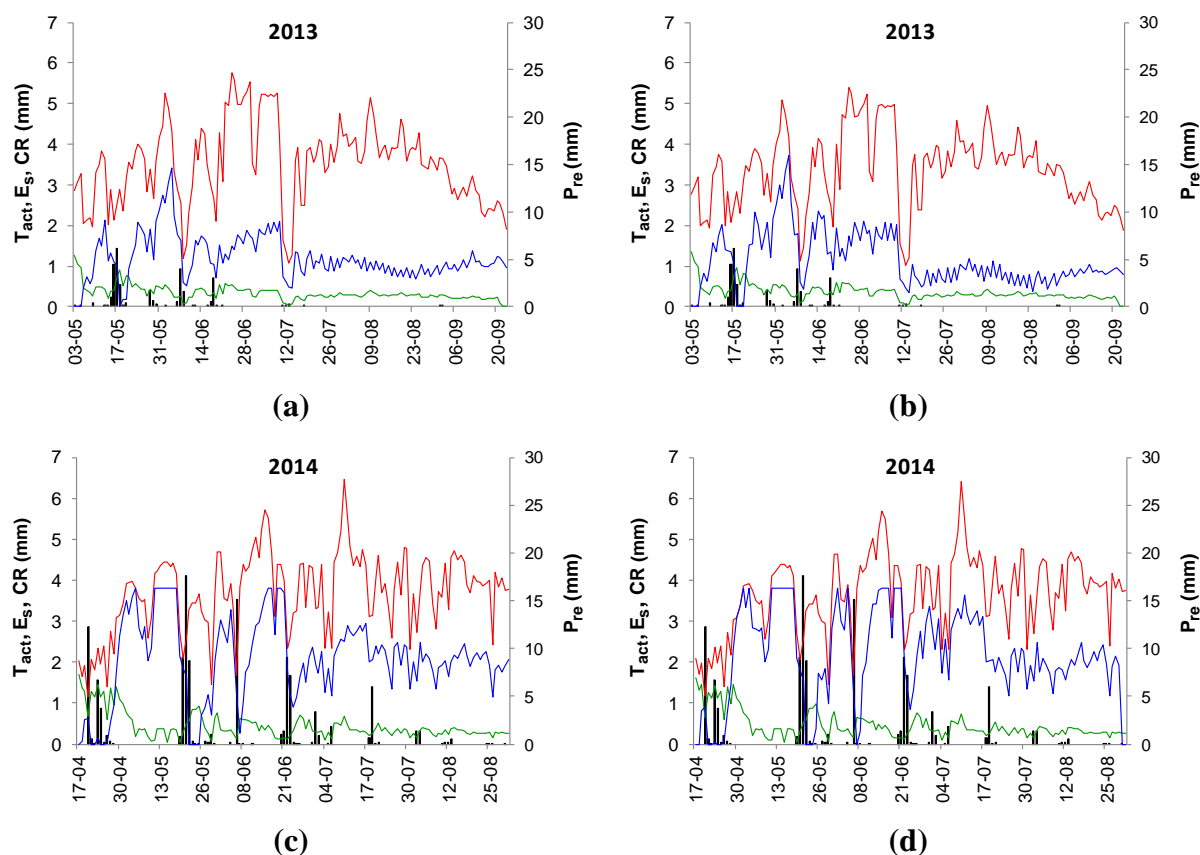


Fig. 4.14. Variação da $T_{c\ act}$ (—), E_s (—), CR (—) e P (—) ao longo das estações de desenvolvimento da cultura da pereira ‘Rocha’ em 2013 e 2014.

Ao nível da totalidade do período analisado, a Tabela 4.7 mostra que E_s foi praticamente igual nas duas réplicas do dispositivo experimental, variando 49-51 mm em 2013 e 61-63 mm em 2014, representando 9% e 11% da ET_a (média das duas réplicas), respectivamente, em 2013 e 2014. Constata-se assim que apesar da rega ter sido em 2013 mais do dobro (291 mm) do que foi em 2014 (128 mm), o impacto deste facto na E_s , devido á reduzida f_w , foi desprezível quando comparado com a influência que a precipitação, bastante maior em 2014 (115 mm) do que em 2013 (29 mm), teve na E_s . Quanto à CR foi em 2013 de 173 e 165 mm, respectivamente, para as réplicas 1 e 2, e em 2014 de 283 mm (réplica 1) e 299 mm (réplica 2), representando 31% da ET_a em 2013 e 50-53% da ET_a em 2014 (com o valor maior para a réplica 2). A tabela 4.7 também mostra que a variação de ASW (ΔASW) foi mais elevada em 2013 (62-71 mm) do que em 2014 (48-56 mm), essencialmente devido à menor amplitude de variação da D_{WT} em 2014, que induziu uma maior CR e portanto promoveu um maior uso da água da toalha freática para consumo pelas árvores.

Tabela 4.7. Termos do balanço hídrico do solo observados (P e rega) e simulados pelo modelo (ΔASW , CR, $ET_{c\ act}$, $T_{c\ act}$ e E_s) em 2013 e 2014

Componente	unidades	2013		2014	
		Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2
P	mm	29	29	115	115
Rega	mm	291	291	128	128
ΔASW	mm	71	62	56	48
CR	mm	173	165	283	299
$ET_{c\ act}$	mm	557	538	568	566
$T_{c\ act}$	mm	508	487	507	503
E_s	mm	49	51	61	63

4.4. Estudo de caso do pomar de limoeiros

4.4.1. Caracterização do local e do dispositivo experimental

O pomar de limoeiros, objecto deste estudo, encontra-se instalado numa parcela de 5 hectares localizada na freguesia da Barreiralva, concelho de Mafra (39° 01' 50'' N, 09° 18' 20'' O) (Fig. 4.15). A parcela dista da do estudo de caso anterior 6.6 Km sendo o clima na região o mesmo (Csb segundo a classificação de Koppen). Os valores diários da temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$) e mínima ($T_{m\acute{i}n}$), radiação solar (R_s) e precipitação registados na estação meteorológica da Barreiralva, anexa à parcela (Fig. 4.15), bem como a ET_o calculada com os dados desta estação através do método FAO-PM apresentam-se na Fig. 4.16. As séries de RH_{max} , RH_{min} e u_z não se apresentam pois os respectivos aparelhos de medição não estavam a funcionar correctamente, como já explicado no ponto 4.2.4.

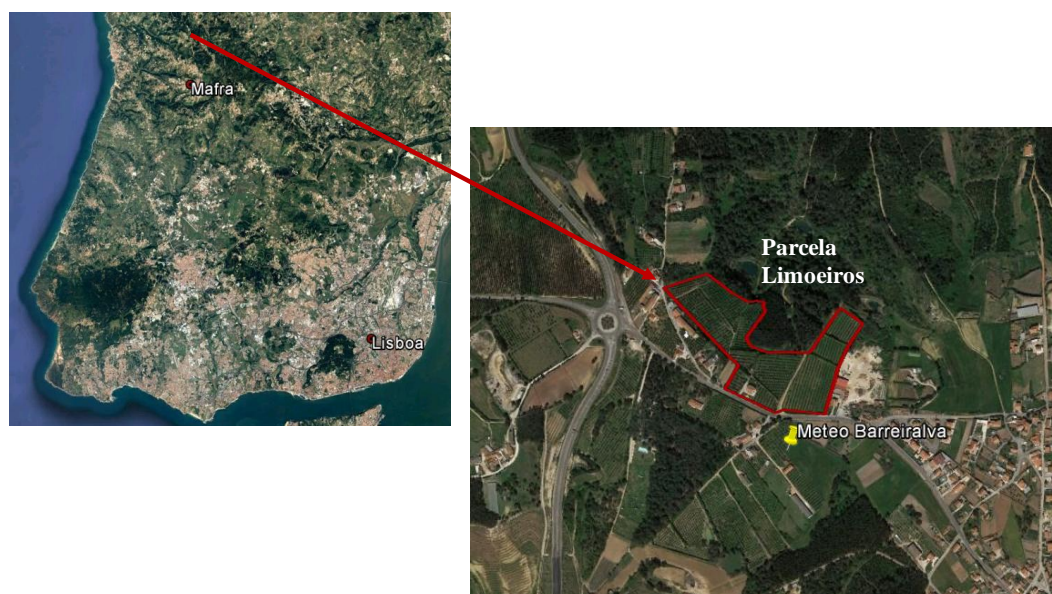


Fig. 4.15. Localização do pomar de limoeiros onde foram realizados os ensaios e da estação meteorológica anexa à parcela.

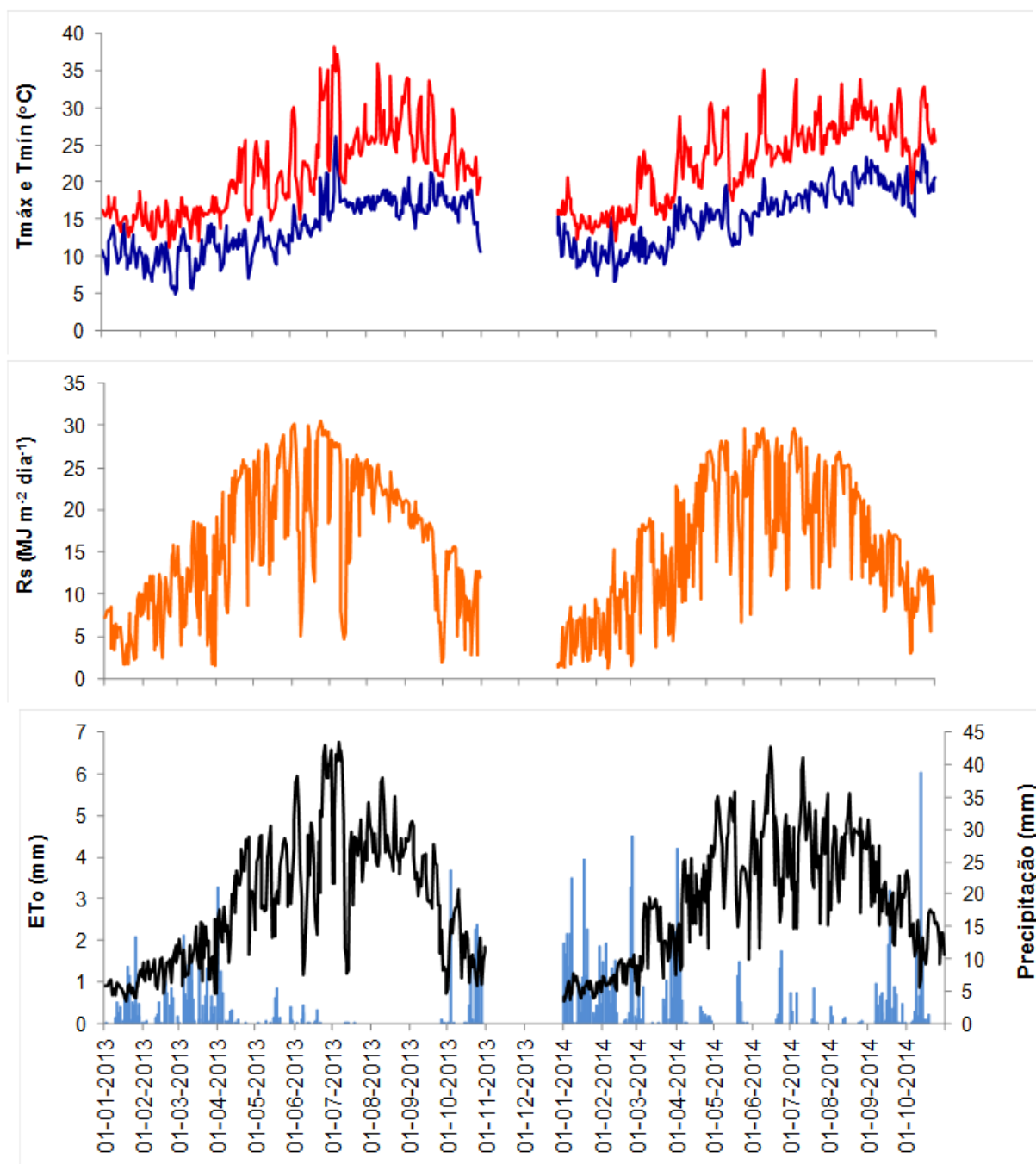


Fig. 4.16. Valores diários de $T_{máx}$ (—), $T_{mín}$ (—), R_s (—), precipitação (—) e ET_0 (—) em 2013 e 2014 (de 01-01 a 31-10) medidos ou calculados (caso da ET_0) na estação da Barreiralva.

O solo da parcela é constituído nos primeiros 50 cm por uma camada de textura franco-arenosa/areno-franca com elevado teor em matéria orgânica importada de um outro local e assente sobre o solo original de textura franco-argilo-arenosa, previamente terraplanado. As propriedades hidráulicas básicas e texturais do solo são apresentadas na Tabela 4.8. Com base nos valores de θ_{CC} e θ_{CE} , e na espessura da camada a que dizem respeito, calculou-se uma disponibilidade máxima de água no solo (TAW) até 0.9 m de profundidade de 96 mm.

Tabela 4.8. Propriedades hidráulicas e texturais do solo na parcela de limoeiros estudada, em Barreiralva, Mafra.

Camada (m)	Areia grossa (%)	Areia fina (%)	Limo (%)	Argila (%)	θ_s (m ³ m ⁻³)	θ_{FC} (m ³ m ⁻³)	θ_{WP} (m ³ m ⁻³)
0.0-0.10	52.3	29.5	7.8	10.4	0.398	0.173	0.066
0.10-0.20	56.2	27.5	7.8	8.5	0.415	0.174	0.071
0.20-0.30	60.3	24.2	9.1	6.4	0.380	0.185	0.079
0.30-0.40	62.4	22.2	9.4	6.0	0.404	0.153	0.068
0.40-0.50	58.3	24.7	10.0	7.0	0.440	0.153	0.067
0.50-0.60	44.1	28.6	10.0	17.3	0.452	0.238	0.111
0.60-0.70	43.1	26.5	9.82	20.6	0.407	0.269	0.141
0.70-0.80	40.9	23.9	10.4	24.8	0.397	0.250	0.141
0.80-0.90	43.5	26.5	9.1	21.0	0.374	0.272	0.168

A parcela em estudo é um pomar de limoeiros adulto, com um compasso de 5 x 4 m, regado por gota-a-gota com dupla linha de ramais porta-gotejadores, dispostos dum lado e do outro da linha de árvores e afastados dos troncos cerca de 30 cm. O espaçamento entre gotejadores nos ramais é de 2.0 m, i.e., com quatro gotejadores por árvore, debitando 4 l h⁻¹. A uniformidade de distribuição do sistema (Pereira, 2004) foi de 95%, calculada a partir de medições de caudal a meio do ramal e nos terços mais e menos favoráveis deste. A dotação de rega variou 0.8-1.6 mm em 2013 e 2014 (Fig. 4.21), calculada multiplicando a taxa de aplicação (mm h⁻¹) dos gotejadores pelos tempos de rega (h) fornecidos pelo produtor.

Os estádios de desenvolvimento padrão preconizados em FAO 56 (Allen et al., 1998) não se aplicam à cultura do limoeiro, dado ser uma espécie de folha persistente que frutifica ao longo do ano inteiro. No entanto, e através de uma comunicação pessoal com o produtor, podem considerar-se os seguintes estádios: 1) repouso vegetativo invernal (Dezembro-Março); 2) um estágio inicial de desenvolvimento vegetativo lento, com o surgimento de novos ramos e folhas, que começa com a poda em fins de Março-início de abril e que se prolonga até algures entre a primeira floração (início de Maio) e o vingamento dos primeiros frutos (meados-fim

de Maio); e 3) um estágio de desenvolvimento vegetativo contínuo, com mais uma ou duas florações entre Julho e Setembro, que se prolonga até ao início do Inverno. Para efeitos de simulação consideraram-se estes estádios que foram delimitados de acordo com as datas especificadas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9. Estádios de desenvolvimento dos limoeiros na parcela estudada.

Estádio de desenvolvimento	Datas
Repouso vegetativo	01-12 a 31-03
Estádio inicial (1ª floração e vingamento dos frutos)	01-04 a 20-05
Pleno desenvolvimento (2ª e 3ª floração)	21-05 a 30-11

A profundidade radicular foi inspeccionada apenas no fim das campanhas de rega de 2013 e 2014, correspondendo assim o valor obtido à profundidade radicular máxima ($Z_{r\text{ máx}}$), tendo-se adoptado um esquema similar ao do estudo de caso da pereira ‘Rocha’ para a sua medição: 1) escavação de uma trincheira com 50 cm de profundidade, apanhando as fracções do solo humedecidas e não humedecidas pela rega; 2) inspecção a maiores profundidades com recurso a uma sonda de trado para colher amostras de solo de 15 em 15 cm desde o fundo da trincheira até 1.5 metros de profundidade (relativamente à superfície do solo) em ambas as zonas humedecida e não humedecida do solo, com duas repetições em cada uma; e 3) inspecção da presença de raízes finas numa peneira com malha de 2 mm após lavagem das amostras para remoção da terra fina. Verificou-se, tanto em 2013 como em 2014, uma maior densidade de raízes no bolbo humedecido pela rega do que na zona não humedecida próxima da projecção vertical da copa. Na zona humedecida a profundidade radicular atingiu 1.1 metros de profundidade em 2013 e 0.9 m em 2014, embora a maior densidade de raízes se encontrasse em ambos os anos nos primeiros 50 cm do solo, na camada de solo com mais elevado teor em matéria orgânica, com pronunciado decréscimo a partir dessa profundidade principalmente em 2014. Na fracção do solo não humedecida pela rega, detectaram-se raízes finas até 1.2 metros de profundidade em 2013 (o ano menos chuvoso dos dois) e 1.0 metros em 2014 (ano com precipitação abundante na Primavera), mais concentradas nos primeiros 50-60 cm de solo, embora em 2013 o decréscimo da densidade radicular abaixo daquela profundidade fosse menos acentuado do que em 2014. Esta constatação foi confirmada pelas leituras do teor de humidade com a sonda *Diviner 2000*, que mostraram uma maior depleção da água a 0.9 metros de profundidade em 2013 comparativamente a 2014. Também se constatou, aquando da abertura da trincheira a meio da entrelinha para a colheita de amostras de solo para averiguação das propriedades hidráulicas e texturais, a presença de raízes grossas

nas paredes da trincheira, sinal da elevada extensão horizontal do sistema radicular que explora a totalidade do solo. Assim, e atendendo ao exposto atrás, nomeadamente quanto à distribuição da densidade radicular com a profundidade em ambas as fracções humedecida e não humedecida pela rega, assumiu-se $Z_{r\text{ máx}} = 1.1$ m em 2013 e 0.9 m em 2014. No entanto, mais uma vez, como a sonda apenas alcança os 0.9 metros de profundidade, considerou-se $Z_{r\text{ máx}} = 0.9$ m para efeitos de cálculo do balanço hídrico, portanto com algum prejuízo para efeitos da estimação da ET_c através dos valores medidos do SWC no ano de 2013.

A f_{PAR} ao longo dos ciclos de desenvolvimento de 2013 e 2014, medida nas duas árvores anexas a cada réplica do dispositivo experimental e seguindo o esquema descrito para o estudo de caso da pereira ‘Rocha’, apresenta-se na Fig. 4.17. Pode observar-se o aumento contínuo da f_{PAR} ao longo das duas estações de desenvolvimento, de 0.5-0.55 (cerca de um mês e meio após a poda) até 0.8 no fim de Setembro em 2013, e de 0.5 (15 dias após a poda) até 0.7 no final de Agosto em 2014.

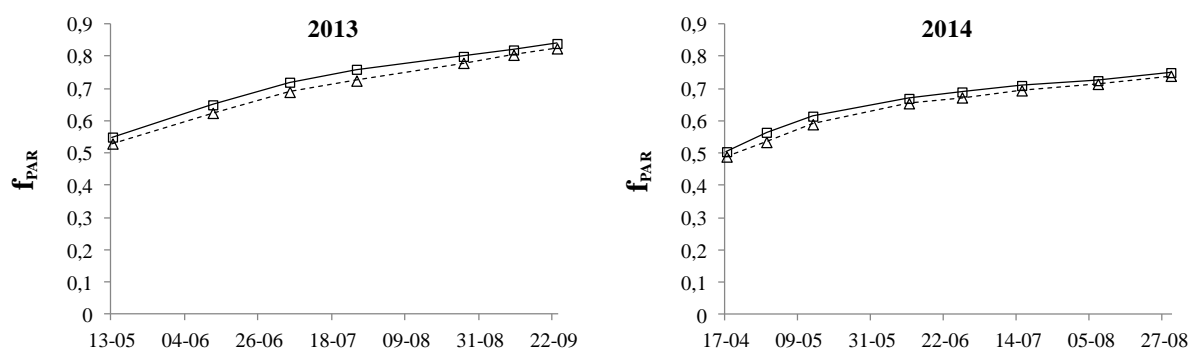


Fig. 4.17. Evolução da f_{PAR} no pomar de limoeiros ao longo das estações desenvolvimento de 2013 e 2014 nas duas árvores anexas à réplica 1 (——, \square) e à réplica 2 (-----, \triangle) do dispositivo experimental.

Os valores do teor de água do solo (SWC) ao longo das estações de desenvolvimento de 2013 e 2014 foram calculados corrigindo as leituras semanais efectuadas com a sonda *Diviner 2000* através de um modelo linear obtido por regressão entre os valores do SWC calculados por gravimetria (de 0.1 em 0.1 m até 0.9 m e com três repetições) e as leituras efectuadas com a sonda para as três condições de humidade do solo: seca, intermédia e húmida, cujos parâmetros e representação gráfica se apresentam na Fig. 4.18. Tal como se pode observar, foram utilizadas duas curvas de regressão, uma para a camada 0-50 cm de textura franco-arenosa/areno-franca e outra para camada 50-90 cm de textura franco-argilo-arenosa, dadas as características hidráulicas e texturais muito diferentes destas duas camadas.

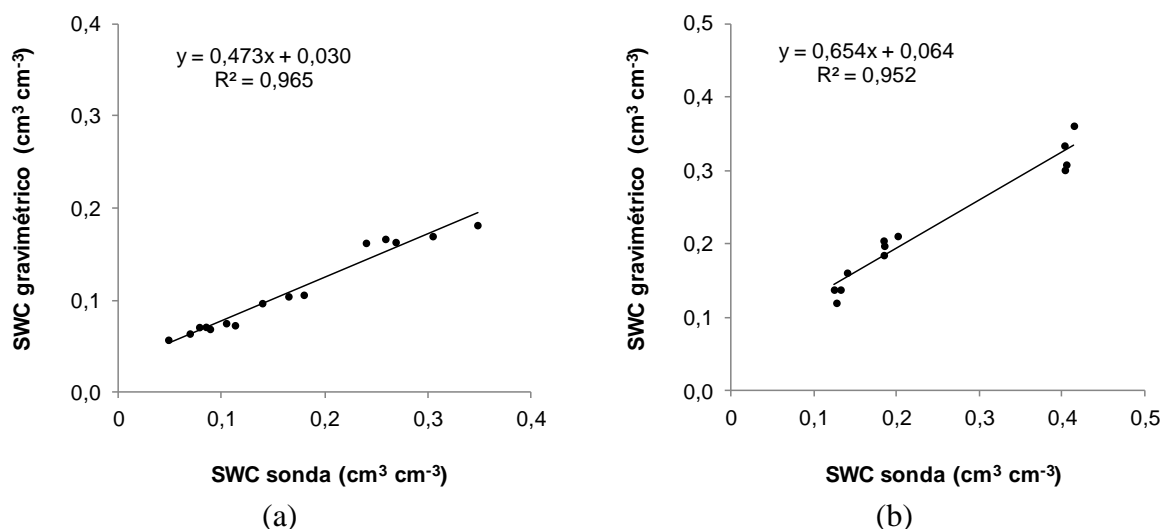


Fig. 4.18. Recta de regressão, e respectivos parâmetros, ajustada aos pares de valores do SWC medido pelo método gravimétrico e pela sonda, utilizada para a calibração das leituras da sonda no pomar de limoeiros: a) profundidades de 10 a 50 cm; b) profundidades de 60 a 90 cm.

O dispositivo experimental utilizado para a monitorização do SWC apresenta-se na Fig. 4.19, seguindo um esquema similar ao do estudo de caso da pereira, à excepção de que os dois primeiros tubos das duas filas foram instalados a meio do espaçamento entre os dois tubos porta-gotejadores. Assim, estes dois tubos e os dois seguintes posicionados a 60 cm dos primeiros, são aqueles que reflectem as condições de humidade no solo criadas pela rega, enquanto os restantes captam as condições de humidade em sequeiro. O espaçamento entre os três primeiros tubos em cada linha é de 60 cm enquanto que o terceiro dista do quarto, posicionado perto do meio da entrelinha, 80 cm. O espaçamento entre as duas fileiras de tubos é de 70 cm. À semelhança do estudo de caso anterior, foram instaladas duas réplicas do dispositivo na mesma linha de árvores, distando uma da outra 8 metros.

O teor de água no solo foi obtido, à semelhança do estudo de caso anterior, calculando num primeiro passo a média ponderada do SWC em cada uma das duas fileiras de tubos através da Eq. 4.4, cujos pesos de cada tubo foram: $d_1 = 0.3$ m, $d_2 = 0.6$ m, $d_3 = 0.7$ m e $d_4 = 0.9$ m (indicados a negrito na Fig. 4.19). Depois, o SWC final foi calculado como a média simples do SWC das duas fileiras.

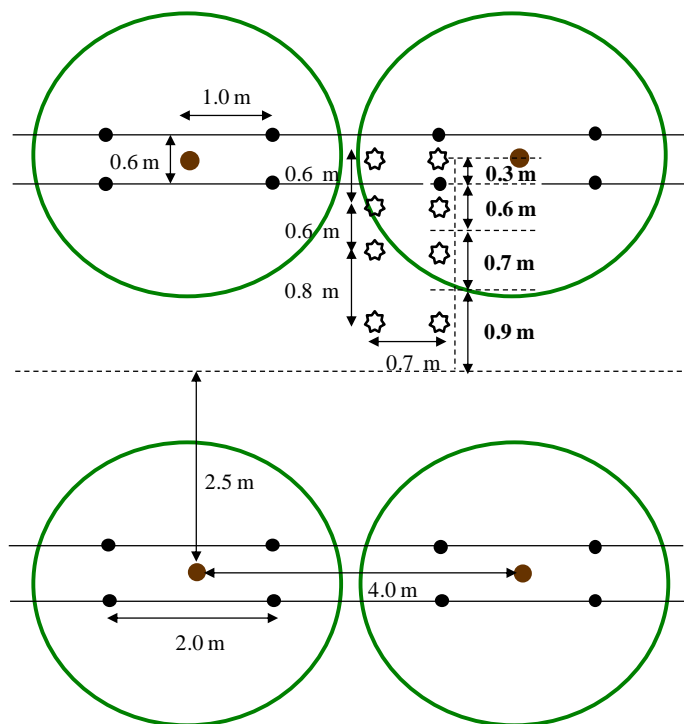


Fig. 4.19. Dispositivo experimental utilizado para a medição do teor de água do solo no pomar de limoeiros: tronco das árvores (●), gotejadores(●) e tubos de acesso à sonda (☆); as distâncias indicadas a negrito e a letra normal junto aos tubos, referem-se, respectivamente, ao peso atribuído a cada tubo para o posterior cálculo do SWC ponderado em cada fila e às distâncias entre tubos.

4.4.2. Resultados

4.4.2.1. Calibração e validação do modelo

Os valores de $K_{cb \text{ crop full}}$ (durante os estádios inicial e médio, e para o final do ciclo de desenvolvimento), de M_L e de p propostos em Allen e Pereira (2009) e Allen et al. (1998) para os citrinos (e assumindo tal como no estudo de caso anterior, $K_{c \text{ min}} = 0.05$), foram aplicados nas simulações iniciais com o modelo: $K_{cb \text{ full ini}} = 0.85$, $K_{cb \text{ full mid}} = 0.85$, $K_{cb \text{ full end}} = 0.85$, $M_L = 2.0$ e $p = 0.5$ (Tabela 4.10). Os valores padrão de $K_{cb \text{ crop full}}$ foram calculados de acordo com a Fig. 3.3 do Capítulo 3, com $h_{\text{crop}} = 3.5$ m e um valor de $F_r = 0.71$ comum para os estádios inicial e médio (*mid-season*), e para o fim da estação de desenvolvimento (Allen e Pereira, 2009). Na Tabela 4.10 apresentam-se também os valores dos K_{cb} resultantes do ajustamento dos valores padrão de $K_{cb \text{ crop full}}$ às condições actuais da f_c ($K_{cb \text{ adj}}$) no primeiro dia do período analisado, no período de máxima cobertura e no fim do ciclo de desenvolvimento, tanto em 2013 como em 2014: $K_{cb \text{ adj ini}} = 0.70$, $K_{cb \text{ adj mid}} = 0.81$ e $K_{cb \text{ adj end}} = 0.82$ em 2013, e $K_{cb \text{ adj ini}} = 0.65$, $K_{cb \text{ adj mid}} = 0.79$ e $K_{cb \text{ adj end}} = 0.80$ em 2014. O valor

inicial de TEW foi calculado como no estudo de caso anterior, assumindo $Z_e = 0.1$ m, enquanto que para REW considerou-se o valor tabelado em Allen et al. (1998) para solos franco-arenosos. Assim foram utilizados inicialmente os valores: $Z_e = 0.1$ m, $TEW = 14$ mm e $REW = 8$ mm (Tabela 4.10). Os valores dos parâmetros para o cálculo da percolação profunda, e de acordo com as instruções de Liu et al. (2006), inicializaram-se com $a_{pp} = 240$ mm m^{-1} e $b_{pp} = -0.0173$ (Tabela 4.10).

Com base na distribuição e na intensidade da precipitação nos 15 dias anteriores ao início das simulações, assumiu-se um depleção inicial da água na camada evaporável (D_e) de 100% em 2013 e 50% em 2014. Atendendo aos teores de água do solo medidos à data de início das simulações, a depleção inicial da água do solo na zona radicular (D_r), assumindo $Z_{r\ act} = Z_{r\ máx}$, foi estabelecida em 2013 em 4% e 2% de TAW, respectivamente, para a réplica 1 e 2 do dispositivo experimental, e em 2014 em 3% de TAW para ambas as réplicas.

Tabela 4.10. Valores iniciais (padrão) e calibrados dos parâmetros da cultura do limoeiro necessários ao cálculo do K_{cb} para as condições actuais de densidade, da sensibilidade da cultura ao stress hídrico, dos parâmetros da evaporação do solo e dos parâmetros da percolação profunda.

	Padrão*		Calibrados	
Cultura				
Ajustamento dos $K_{cb\ full}$ de acordo com a f_c				
Ano	2013	2014	2013	2014
$K_{cb\ full\ ini}$		0.85		0.5
$K_{cb\ full\ mid}$		0.85		0.7
$K_{cb\ full\ end}$		0.85		0.7
$K_{c\ min}$		0.05		0.05
M_L		1.75		1.5
$K_{cb\ adj\ ini}$	0.70	0.65	0.41	0.38
$K_{cb\ adj\ mid}$	0.81	0.79	0.67	0.65
$K_{cb\ adj\ end}$	0.82	0.80	0.68	0.66
Sensibilidade da cultura ao stress-hídrico				
p (comum a todos os de desenvolvimento)		0.5		0.5
Solo				
Z_e (m)		0.1		0.1
TEW (mm)		14		14
REW (mm)		8		6
Percolação profunda				
a_{pp}		240		240
b_{pp}		-0.0173		-0.0173

* Provenientes de Allen et al., (1998, 2005b), Allen e Pereira (2009) e Liu et al., (2006).

A calibração dos valores padrão dos parâmetros referidos anteriormente (seguindo o procedimento exposto em 4.2.2), resultou em: redução de $K_{cb\ full\ ini}$ de 0.85 para 0.5, e de ambos $K_{cb\ full\ mid}$ e $K_{cb\ full\ end}$ de 0.85 para 0.7, M_L foi reduzido de 2.0 para 1.5, p manteve-se inalterado, assim como os parâmetros a_{pp} e b_{pp} do cálculo da DP, Z_e manteve o seu valor inicial, tal como TEW, enquanto REW foi reduzido de 8 para 6 mm. A redução, aquando da calibração, dos valores iniciais (padrão) de $K_{cb\ full\ ini}$, $K_{cb\ full\ mid}$, $K_{cb\ full\ end}$ e M_L , fez com que aqueles primeiros três valores quando ajustados às condições actuais de f_c fossem também reduzidos relativamente aos seus homólogos padrão: em 2013, $K_{cb\ adj\ ini}$ decresceu de 0.7 para 0.41, $K_{cb\ adj\ mid}$ de 0.81 para 0.67 e $K_{cb\ adj\ end}$ de 0.82 para 0.68, enquanto que em 2014, o decréscimo daqueles valores foi de, respectivamente, 0.65 para 0.38, 0.79 para 0.65 e 0.80 para 0.66 (Tabela 4.10). Realça-se a redução mais drástica do valor padrão de $K_{cb\ full\ ini}$ relativamente à efectuada aos valores de $K_{cb\ full\ mid}$ e $K_{cb\ full\ end}$ (e consequentemente de $K_{cb\ adj\ ini}$ relativamente aos de $K_{cb\ adj\ mid}$ e $K_{cb\ adj\ end}$), podendo estar relacionada com possíveis efeitos da poda e/ou da própria fisiologia dos limoeiros no rácio ET_c/ET_o durante o período inicial. Faz-se também notar que o período inicial a que se reportam os valores de $K_{cb\ full\ ini}$ e $K_{cb\ adj\ ini}$ foi ajustado durante a calibração de 01-04 a 20-05 para 01-04 a 31-05 (ver Tabela 4.9), revelando-se essencial para um melhor ajuste entre os valores da ASW medidos e simulados.

Os valores simulados e observados da água disponível no solo (ASW) nos anos de 2013 e 2014 para as duas réplicas do dispositivo experimental são apresentados na Fig. 4.20. Os valores da ASW em 2013 para a réplica 1, utilizados para a calibração do modelo, correspondem à Fig. 4.20a, enquanto que os restantes casos correspondem à validação do modelo em 2013 (Fig. 4.20b) e em 2014 (Figs. 4.20c e 4.20d). A figura mostra uma grande amplitude de variação da ASW medida e que não existem diferenças significativas entre os valores da ASW nas duas réplicas do dispositivo experimental, à excepção da segunda metade da estação de desenvolvimento de 2013, em que a ASW na réplica 1 foi persistentemente (embora não significativamente) mais elevada do que na réplica 2. As previsões da ASW pelo modelo seguiram de perto a ASW medida para todos os casos, embora com uma ligeira sobrestimação durante o período atrás mencionado para a réplica 2 em 2013, o que confere alguma confiança quanto à fiabilidade das estimativas da ET_c pelo modelo. Salienta-se também que a onda de calor ocorrida entre 20-06 e 10-07, que elevou a ET_o persistentemente para cerca de 6 mm, não foi devidamente acompanhada por um aumento da dotação de rega, o

que conduziu a uma excessiva depleção da ASW, que teve como consequências baixos valores da ASW ao longo da segunda metade do período.

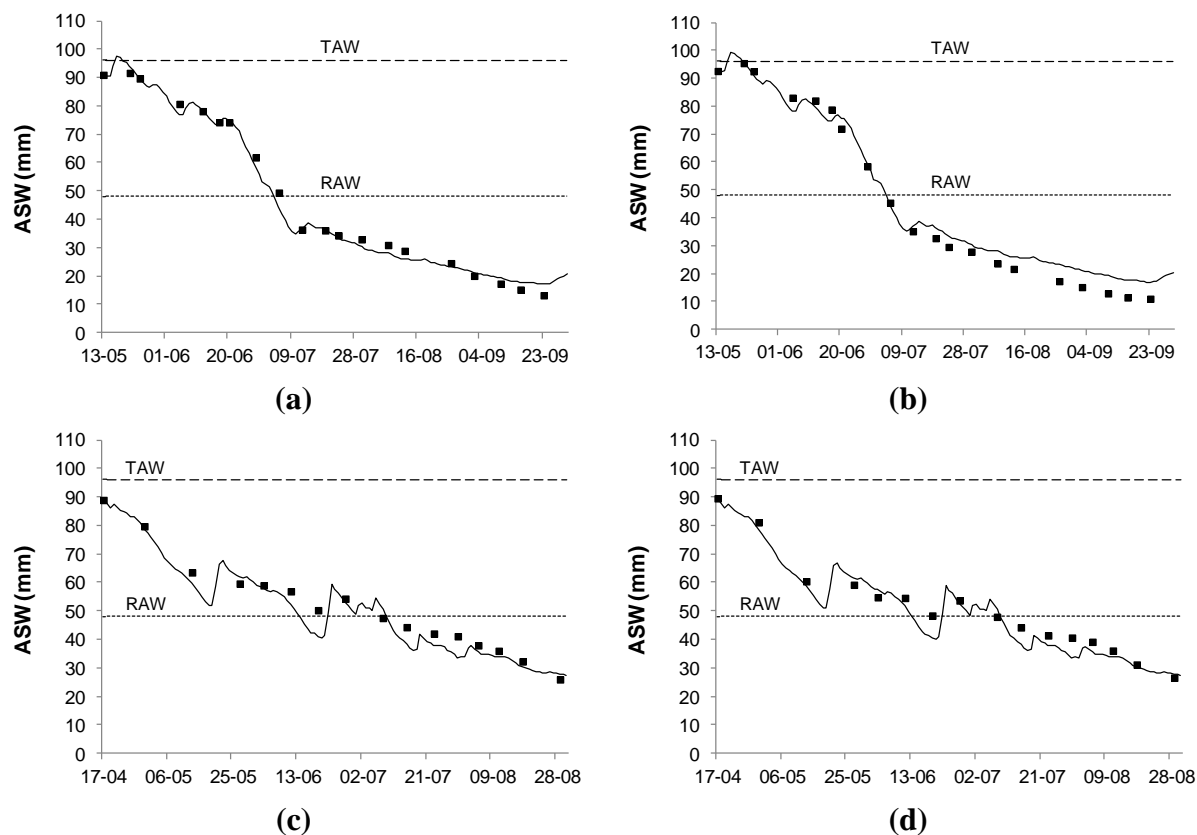


Fig. 4.20. Valores da ASW medidos e simulados pelo modelo calibrado ao longo das estações de desenvolvimento da cultura do limoeiro: a) réplica 1 do dispositivo experimental em 2013; b) réplica 2 em 2013; c) réplica 1 em 2014; e d) réplica 2 em 2014

Os indicadores da qualidade do ajustamento entre a ASW medida e observada apresentam-se na Tabela 4.11. O coeficiente da regressão forçada à origem (b_0) foi próximo de 1.0 para os quatro casos, mostrando a proximidade estatística entre os valores da ASW medida e simulada, sem subestimações nem sobrestimações significativas. Os coeficientes de determinação (R^2) variaram entre 0.96 a 0.99, indicando que uma grande percentagem da variabilidade total dos dados observados foi explicada pelo modelo. Os valores de RMSE foram ≤ 4.1 mm, representando menos de 4.5% de TAW; o AAE foi inferior a 3.5 mm e o ARE inferior a 7.5% excepto no caso da réplica 2 do dispositivo experimental em 2013, em que a diferença entre a ASW medida e simulada correspondeu em média a 16.6% da ASW medida; EF variou de 0.94 a 0.99 e $d_{IA} \geq 0.98$ para os quatro casos. Ao analisar todos os casos em conjunto: $b_0 = 0.98$ e $R^2 = 0.98$, RMSE e AAE foram muito reduzidos, respectivamente, 3.6 e 2.9 mm, e os valores de EF e d_{IA} , respectivamente, 0.98 e 0.99, foram

bastante elevados (Tabela 4.11). Em resumo, os resultados indicam que modelo teve um bom desempenho em prever os valores da ASW, e consequentemente da ET_c , para a cultura do limoeiro em dois anos com características climáticas diferentes.

Tabela 4.11. Indicadores da qualidade do ajustamento entre os valores da ASW medida e simulada pelo modelo para o estudo de caso do pomar de limoeiros.

<i>Indicadores do ajustamento</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>RMSE</i> (mm)	<i>RMSE/TAW</i> (%)	<i>ARE</i> (%)	<i>AAE</i> (mm)	<i>EF</i>	<i>d_{IA}</i>
Réplica 1 2013 (Calibração)	0.99	0.99	2.4	2.5	6.2	1.8	0.99	0.99
Réplica 2 2013 (Validação)	1.00	0.99	4.0	4.2	16.6	3.4	0.98	0.99
Réplica 1 2014 (Validação)	0.96	0.96	4.1	4.3	7.3	3.4	0.94	0.98
Réplica 2 2014 (Validação)	0.97	0.97	3.7	3.9	6.7	3.0	0.95	0.99
<i>Conjunto dos ensaios</i>	<i>0.98</i>	<i>0.98</i>	<i>3.6</i>	<i>3.8</i>	<i>9.5</i>	<i>2.9</i>	<i>0.98</i>	<i>0.99</i>

4.4.2.2. Curvas dos coeficientes culturais: K_{cb} , $K_{cb\ act}$, K_e

As séries temporais de K_{cb} , K_e e K_{cb} ajustado ao stresse hídrico ($K_{cb\ adj} = K_s K_{cb}$), da precipitação e da rega ao longo das estações de desenvolvimento de 2013 e 2014 são apresentados na Fig. 4.21 para a réplica 1 do dispositivo experimental. Em ambos os casos pode constatar-se que os valores mais elevados de K_e ocorrem em resposta à precipitação, em 2013 concentrada apenas no período inicial e em 2014 mais distribuída ao longo de todo o período analisado. Durante o período de máxima f_c , o K_e manteve-se a um nível baixo (0.06-0.07) e praticamente constante em 2013, em concordância com a ausência de precipitação, elevada frequência da rega e baixa f_w , enquanto em 2014, apesar de também baixo, os seus valores apresentaram alguns ‘picos’ em resposta a pequenas precipitações, sendo bem patente na figura as diferenças consideráveis ao nível do K_e entre 2013 e 2014. A influência da f_c nos valores de K_e fez-se sentir apenas em 2014, na medida em que a precipitação ocorrida no início do período analisado, portanto numa altura em que a f_c é ainda baixa e a exposição do solo maior, provocaram subidas no K_e maiores do que as provocadas por precipitações ocorridas mais tarde, já numa fase com máxima f_c , para quantidade similares ou maiores de água precipitada. Os valores de $K_{cb\ pot}$ são muito próximos nos dois anos, contrariamente aos valores de $K_{cb\ act}$, que em 2013 sofreram uma forte redução a partir de 06-07 até ao final, enquanto que em 2014 essa redução foi um pouco mais tardia (12-07) e menos pronunciada. Estes resultados ilustraram a utilidade do modelo para melhorar a compreensão de como o consumo total de água pela cultura foi repartido entre T_c e E_s em resposta a variações da f_c ao longo do ciclo de crescimento e da frequência e intensidade da precipitação e da rega, bem como o impacto da intensidade do stresse hídrico na T_c .

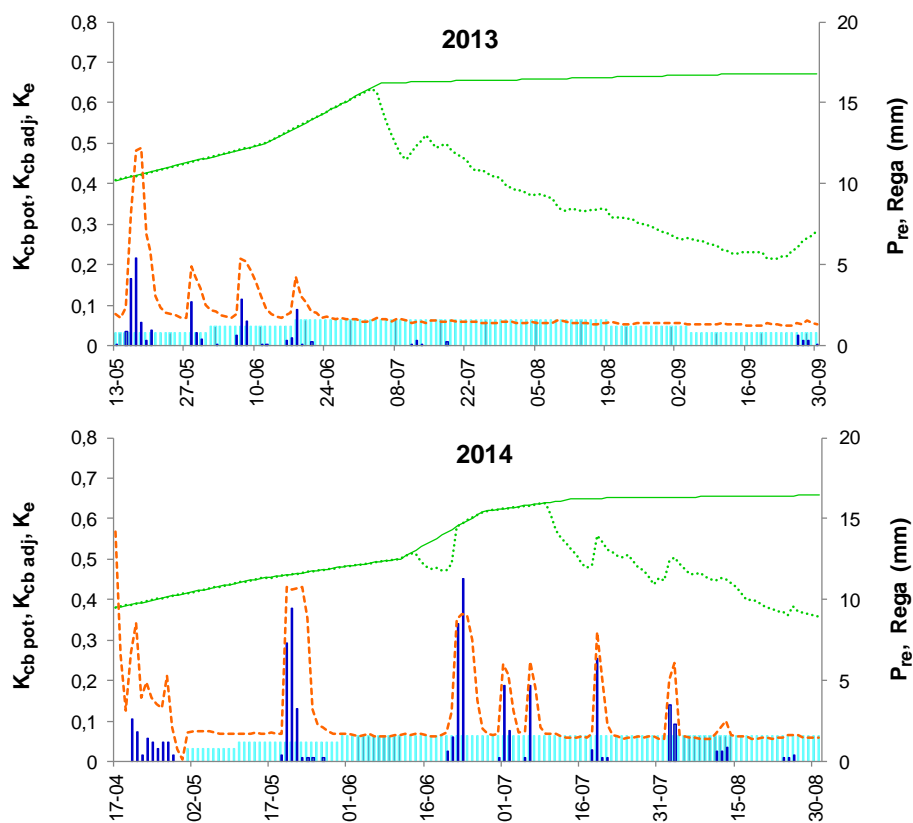


Fig. 4.21. Evolução do K_{cb} potencial - $K_{cb\ pot}$ (—), do K_{cb} ajustado ao stresse-hídrico - $K_{cb\ adj}$ (.....), do K_e (- - -), da P (—) e da rega (—) ao longo dos períodos de desenvolvimento da cultura do limoeiro em 2013 e 2014.

4.4.2.3. Transpiração, evaporação e uso da água

Com o objectivo de analisar o impacto na E_s e na T_c de factores como a frequência e intensidade da precipitação e da rega, o teor de água do solo e a fracção de cobertura do solo (f_c), as estações de desenvolvimento da cultura em 2013 e 2014 foram divididas ao meio e para cada metade foi calculada a E_s , a $T_{c\ act}$ e a $T_{c\ pot}$ acumulada (média das duas réplicas do dispositivo experimental, uma vez que as diferenças entre os dois foram desprezáveis), cujos valores, bem como os dos rácios $T_{c\ act}/T_{c\ pot}$ (%) e $E_s/ET_{c\ act}$ (%), se apresentam na Tabela 4.12. Os resultados mostram que, quando referida à totalidade das estações de desenvolvimento, E_s foi em geral diminuta, representando 15% da $ET_{c\ act}$ em 2013 e 17% desta em 2014, apesar da rega ser efectuada diariamente, se bem que com reduzidas dotações (1.6 mm no máximo). Isto deveu-se essencialmente a uma f_w muito baixa (≈ 0.08) e a uma elevada f_c (variando 0.55-0.8 em 2013 e 0.5-0.7 em 2014), sombreando totalmente f_w . Embora não diferindo E_s em termos percentuais entre a primeira e a segunda metade da estação de crescimento em 2013 (em ambas 15% da $ET_{c\ act}$), em termos absolutos E_s decresceu de 27 para 15 mm, o que mostra

bem a drástica redução da T_c da primeira (150 mm) para a segunda metade do período (85 mm), passando, respectivamente, de uma quebra de 93% da $T_{c\text{ pot}}$ para 47% da $T_{c\text{ pot}}$. Este facto também é notório na Fig. 4.22a, com a curva da E_s mantendo-se mais elevada na primeira metade, principalmente em resposta às precipitações ocorridas nessa altura e à menor f_c , e a curva da $T_{c\text{ act}}$ muito próxima da $T_{c\text{ pot}}$ na primeira metade e reduzindo-se drasticamente na segunda. Contrariamente, em 2014, o pequeno decréscimo da E_s em termos absolutos de 33 para 25 mm da primeira para a segunda metade foi acompanhado por um decréscimo proporcionalmente maior em termos percentuais, de 20% da $ET_{c\text{ act}}$ para 14% da $ET_{c\text{ act}}$, consequência do aumento da $T_{c\text{ act}}$ da primeira (129 mm) para a segunda metade (142 mm), por sua vez associado ao respectivo aumento da $T_{c\text{ pot}}$ (de 132 para 187 mm) e por uma quebra de apenas 76% da $T_{c\text{ act}}$ relativamente à $T_{c\text{ pot}}$ na segunda metade. A Fig. 4.22b ilustra bem estes factos para o ano de 2014: a distribuição mais equilibrada da E_s do ponto de vista quantitativo entre as duas metades, o aumento da $T_{c\text{ pot}}$ da primeira para a segunda metade e uma redução mais atenuada da $T_{c\text{ pot}}$ devido ao stress hídrico.

Tabela 4.12. Valores acumulados da evaporação do solo (E_s), Transpiração actual ($T_{c\text{ act}}$), transpiração potencial ($T_{c\text{ pot}}$) e rácios $T_{c\text{ act}}/T_{c\text{ pot}}$ e $E_s/ET_{c\text{ act}}$ em duas metades dos períodos de desenvolvimento dos limoeiros em 2013 e 2014.

E_s (mm)	T_{act} (mm)	T_{pot} (mm)	T_{act}/T_{pot} (%)	$E_s/ET_{c\text{ act}}$ (%)	E_s (mm)	T_{act} (mm)	T_{pot} (mm)	T_{act}/T_{pot} (%)	$E_s/ET_{c\text{ act}}$ (%)
2013									
1ª metade (13-05 a 22-07)					2ª metade (23-07 a 30-09)				
27	150	161	93	15	15	85	180	47	15
2014									
1ª metade (17-04 a 23-06)					2ª metade (24-06 a 31-08)				
33	129	132	98	20	25	142	187	76	14

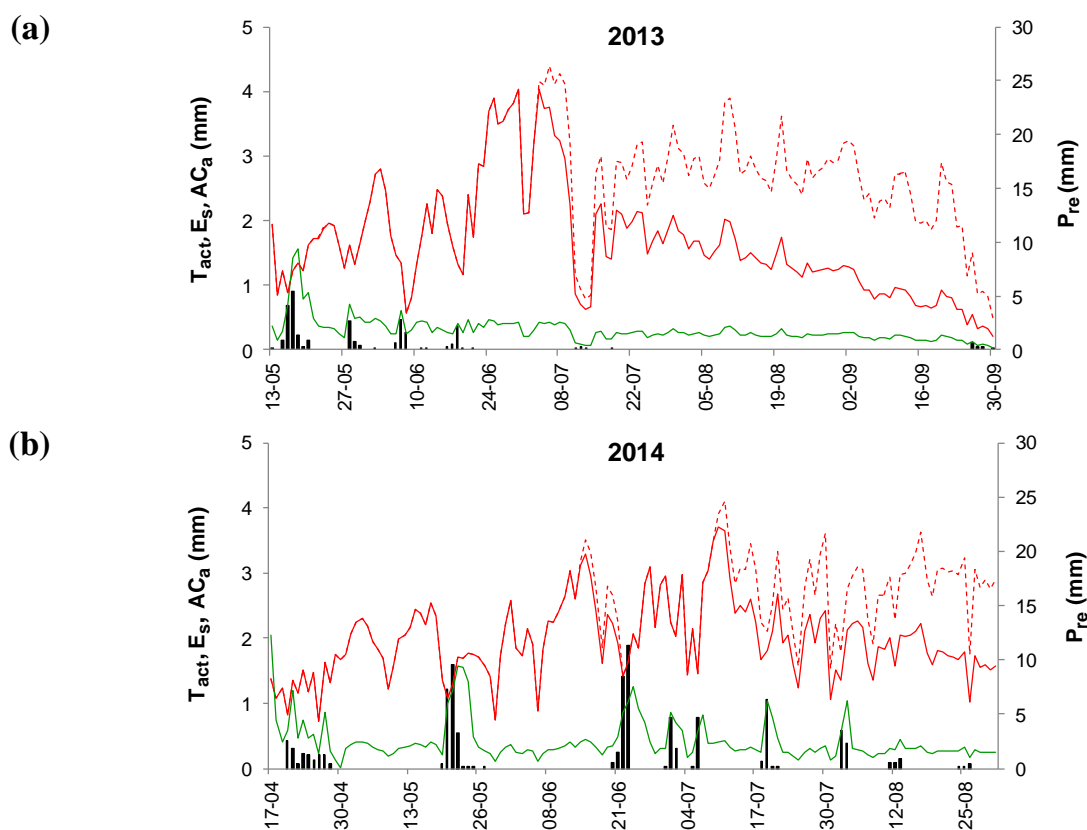


Fig. 4.22. Variação da T_{pot} (---), T_{act} (—), E_s (—) e P (—) ao longo dos períodos de desenvolvimento da cultura do limoeiro em: a) 2013; e b) 2014.

A elevada quebra relativa da $T_{c act}$ em 2013 da primeira para a segunda metade, deveu-se à reduzida precipitação na primeira metade (26 mm) que foi acompanhada por um longo período de forte procura climática (20-06 a 12-07) não compensada pela rega (que totalizou 92 mm) o que levou a uma depleção de 58 mm da ASW (Tabela 4.13), restando pouca água no solo na segunda metade para assegurar a $T_{c pot}$, ou pelo menos uma reduzida quebra desta. Em 2014, uma $T_{c pot}$ mais reduzida (132 mm) (Tabela 4.12) na primeira metade acompanhada por uma precipitação mais elevada (54 mm), conduziram a uma menor depleção da ASW (32 mm), apesar da rega (72 mm) na primeira metade ser inferior à de 2013 (Tabela 4.13), sendo a remanescente ASW e uma P de 28 mm na segunda metade, responsáveis pela menor quebra relativa da $T_{c act}$ (76%) em relação à $T_{c pot}$ (Tabela 4.12).

Tabela 4.13. Valores acumulados da precipitação (P), rega, variação da água disponível no solo (ΔASW), e evapotranspiração cultural actual ($ET_{c\ act}$) em duas metades das estações de desenvolvimento dos limoeiros em 2013 e 2014.

P (mm)	Rega (mm)	ΔASW (mm)	$ET_{c\ act}$ (mm)	P (mm)	Rega (mm)	ΔASW (mm)	$ET_{c\ act}$ (mm)
2013							
1ª metade (13-05 a 22-07)				2ª metade (23-07 a 30-09)			
26	92	58	177	1	85	13	100
2014							
1ª metade (17-04 a 23-06)				2ª metade (24-06 a 31-08)			
54	72	32	162	28	109	29	167

Ao nível da totalidade do período analisado, a Tabela 4.14 mostra que E_s foi praticamente igual nas duas réplicas do dispositivo experimental, variando 41-43 mm (réplica 1 e réplica 2) em 2013 e 56-58 mm (réplica 1 e réplica 2) em 2014, representando 15% e 17% da $ET_{a\ act}$ (média das duas réplicas), respectivamente, em 2013 e 2014. Constata-se assim que uma maior precipitação em 2014 (82 mm) relativamente a 2013 (28 mm) causou um aumento da E_s tanto em termos absolutos como relativos, apesar da rega ter sido quantitativamente semelhante em 2013 e 2014 (respectivamente, 176 e 181 mm). A menor precipitação em 2013 também foi responsável por um maior uso da ASW neste ano comparativamente a 2014, com $\Delta ASW = 71$ mm em 2013 e $\Delta ASW = 62$ mm em 2014 (média das duas réplicas). Foi também a menor precipitação em 2013 que fez com que a $ET_{c\ act}$ nesse ano fosse menor do que em 2014, apesar da $ET_{c\ pot}$ ser 10 mm mais alta em 2013 do que em 2014, essencialmente por via do stress hídrico, que causou uma quebra 20% da $T_{c\ pot}$ em 2013 e de apenas 15% em 2014, mas também pela redução da E_s , tal como já referido acima.

Tabela 4.14. Termos do balanço hídrico do solo observados (P e rega) e simulados pelo modelo (ΔASW , $ET_{c\ act}$, $ET_{c\ pot}$, $T_{c\ act}$, $T_{c\ pot}$ e E_s) em 2013 e 2014 para o estudo de caso do pomar de limoeiros.

Componente	unidades	2013		2014	
		Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2
P	mm	28	28	82	82
Rega	mm	176	176	181	181
ΔASW	mm	72	70	62	62
$ET_{c\ act}$	mm	278	276	328	329
$ET_{c\ pot}$	mm	385	382	376	375
$T_{c\ act}$	mm	237	233	273	271
$T_{c\ pot}$	mm	344	339	321	318
E_s	mm	41	43	56	58

4.5. Conclusões

A metodologia dos K_c duais, o procedimento de cálculo do K_{cb} a partir da f_c e da altura da cultura e as equações paramétricas de Liu et al. (2006) para cálculo da ascensão capilar (CR) implementados no modelo SIMDualKc, permitiram que este, uma vez devidamente calibrado, simulasse bem as dinâmicas do teor de água do solo (SWC) observado para a cultura da pereira ‘Rocha’, fundamentando deste modo os resultados do uso da água, da ET_c e da partição desta entre T_c e E_s . Verificou-se no entanto uma diferença substancial entre os valores de SWC nas duas réplicas do dispositivo experimental, explicadas possivelmente por diferenças à ‘pequena escala’ das propriedades hidráulicas e texturais do solo, e da distribuição e extracção radicular. Para isto também contribuíram decisivamente as diferenças significativas observadas quanto à profundidade da toalha freática entre as duas réplicas, que atingiram em média os 0.3 m. Os valores calibrados de $K_{cb \text{ full}}$ foram mais baixos do que os propostos por Allen e Pereira (2009) em 0.10 unidades, tanto no período inicial e médio (*mid-season*), como no final da campanha de rega de 2013 (no final de Setembro), respectivamente, $K_{cb \text{ full ini}} = 1.05$, $K_{cb \text{ full mid}} = 1.05$ e $K_{cb \text{ full end}} = 0.8$. Esta redução do valor de $K_{cb \text{ full end}}$ prevista em Allen e Pereira (2009) e constataada pelos resultados do modelo em 2013, não se aplicou em 2014 uma vez que neste ano a campanha de rega terminou no final de Agosto, altura em que possivelmente os efeitos de senescência das folhas ou da redução da condutância estomática ainda não se tinham ainda manifestado, mantendo-se $K_{cb \text{ full end}} = 1.05$, i.e., igual ao período inicial e médio. Os rácios $ET_{c \text{ act}}/ET_{c \text{ pot}}$ e $T_{c \text{ act}}/T_{c \text{ pot}}$ foram iguais à unidade, uma vez que o modelo não detectou qualquer stresse hídrico, enquanto que a E_s foi bastante reduzida, com a razão as $E_s/ET_{c \text{ act}}$ a variar 0.09-0.11 entre 2013 e 2014. Contrariamente, a ascensão capilar (CR) foi muito elevada em ambos os anos e réplicas do dispositivo experimental, tendo contribuído em 31% e 50-53% (réplica 1 – réplica 2) para a $ET_{c \text{ act}}$, respectivamente, em 2013 e 2014. Isto deveu-se essencialmente à baixa profundidade da toalha freática, que variou 0.55-1.55 em 2013 e 0.3-1.35 em 2014 para a réplica 1 do dispositivo experimental, situando-se a toalha freática 0.2 a 0.3 m mais próxima da superfície para a réplica 2. As possíveis e observadas diferenças mencionadas acima entre as duas réplicas do dispositivo experimental, determinaram diferenças ao nível da utilização da água armazenada (ΔASW) de 8-9 mm entre réplicas, tendo sido ΔASW 15 mm maior em 2013 do que 2014 de 9 mm, i.e., em 2013 a cultura fez um maior uso da água armazenada no solo. Finalmente verificou-se que a contribuição da cobertura vegetal activa na entrelinha do pomar teve uma contribuição desprezável para a ET total do pomar, fruto da baixa fracção da superfície do solo onde esteve

presente, à sua gestão por operações de corte e ripagem e à absorção da grande maioria da radiação pela cultura.

Quanto ao estudo de caso do pomar de limoeiros, os resultados demonstraram que o modelo, utilizando a abordagem proposta por Allen e Pereira (2009) para cálculo do K_{cb} a partir da f_c e da altura da cultura, descrita no ponto 3.2.2 do Capítulo 3, e uma vez devidamente calibrado, conseguiu simular correctamente as dinâmicas do teor de água do solo (SWC) observado para uma larga gama de variação destes valores e em dois anos com diferentes características climáticas. Constatou-se que os valores de $K_{cb\ full}$ para a cultura do limoeiro obtidos pela calibração e validação do modelo foram mais baixos do que os propostos por Allen e Pereira (2009), em 0.15 unidades no período médio (*mid-season*) e no fim do período total de crescimento analisado, atingindo esta redução 0.35 unidades no período inicial, sendo esta drástica redução de $K_{cb\ full\ ini}$ devida possivelmente à poda realizada em ambos os anos no início da primavera e a uma possível e consequente redução no metabolismo da cultura. Os valores de $ET_{c\ act}$ e de $T_{c\ act}$ foram inferiores aos de $ET_{c\ pot}$ e $T_{c\ pot}$ devido à ocorrência de stresse hídrico, especialmente intenso em 2013 devido a uma condução da rega inadequada, com valores dos rácios $ET_{c\ act}/ET_{c\ pot}$ e $T_{c\ act}/T_{c\ pot}$ a variarem entre anos, respectivamente, 0.72-0.87 (2013-2015) e 0.69-0.85 (2013-2014). A E_s foi reduzida devido à baixa fracção de humedecimento solo pela rega e pelo sombreamento desta pela cultura, com as razões $E_s/ET_{c\ act}$ a atingirem apenas 0.15-0.17.

Capítulo 5

Modelação do uso da água, da transpiração e da evaporação do solo em consociações trigo-milho e trigo-girassol em Hetao, bacia do Rio Amarelo

5.1. Introdução

A consociação de culturas é um sistema ou uma prática de cultivo comum no perímetro de rega de Hetao, na bacia do Rio Amarelo superior, na China, onde as principais culturas são o trigo, o milho e o girassol. Para um melhor uso dos solos, água, radiação e nutrientes, o trigo de primavera é tradicionalmente cultivado em consociação com o milho (T-M) e, mais recentemente, com o girassol (T-G). Atendendo à necessidade de reduzir os desvios de água para rega em Hetao (Miao et al., 2016), o presente estudo tem por objectivo avaliar as estimativas do uso da água nas consociações T-M e T-G em comparação com aquele estimado para as mesmas culturas quando cultivadas isoladamente (i.e., em monocultura). Para isso utilizou-se o modelo SIMDualKc, que foi recentemente dotado de uma extensão para o cálculo da evapotranspiração cultural - ET_c em consociações de culturas, através da consideração de um coeficiente cultural de base - K_{cb} (associado à componente transpirativa da ET_c) combinado para as duas culturas consociadas. Este K_{cb} combinado ($K_{cb\ inter}$) é calculado em função dos valores diários do K_{cb} para cada uma das culturas da consociação quando cultivadas isoladamente, das suas alturas e da fracção da superfície do solo cultivada com cada uma delas. O SIMDualKc foi primeiro calibrado e validado para as monoculturas do trigo, milho e girassol, através da confrontação das previsões do modelo para a água disponível no solo (ASW) com os valores medidos da ASW durante as estações de crescimento de 2010 a 2012, e só depois foi validado para as consociações T-M e T-G, utilizando os parâmetros do modelo previamente calibrados para as monoculturas, e comparando a ASW simulada com a ASW medida durante as estações de crescimento das consociações T-M e T-G em 2010 e 2011. Este capítulo debruça-se então na comparação das estimativas da ET_c , T_c , E_s e contribuição das águas subterrâneas (ascensão capilar - CR) para as três culturas quando cultivadas isoladamente, com as da ET_c , T_c , E_s e CR daquelas culturas quando consociadas.

5.2. Materiais e métodos

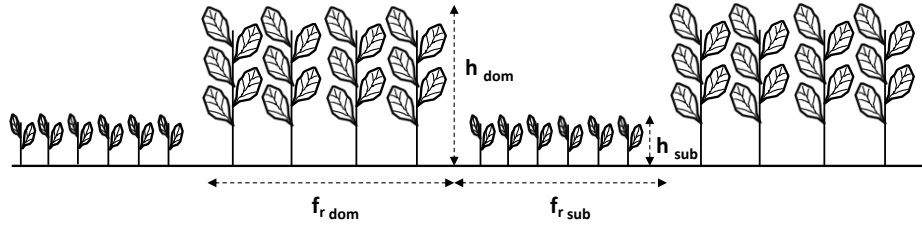
5.2.1. Modelação da ET_c e do uso da água em consociações com o modelo SIMDualKc

No presente estudo o SIMDualKc foi utilizado para estimar a ET_c , a T_c , a E_s , a ascensão capilar (CR) e a percolação profunda (DP) para as culturas do trigo, milho e girassol em sistema de monocultura e para as consociações trigo-milho (T-M) e trigo-girassol (T-G). Para o caso das monoculturas, a descrição das abordagens utilizadas pelo modelo para a estimação das variáveis acima mencionadas remete-se para o Capítulo 3. Para as consociações faz-se aqui uma descrição sumária dos procedimentos utilizados pelo modelo para o cálculo daquelas variáveis, também suportada pela Fig. 5.1, que se passam a enumerar:

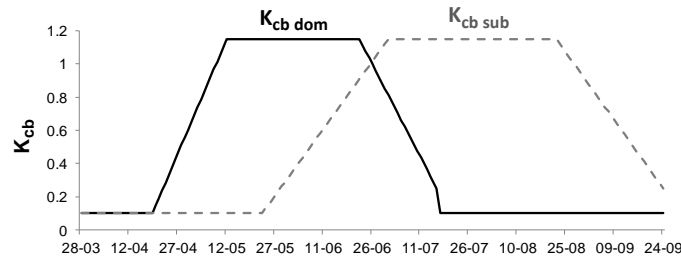
- 1) Cálculo dos valores diários do K_{cb} para a cultura dominante ($K_{cb\ dom}$) e subordinada ($K_{cb\ sub}$) quando cultivadas isoladamente;
- 2) Cálculo dos valores diários dos coeficientes de densidade da cultura dominante ($K_{d\ dom}$) e subordinada ($K_{d\ sub}$), que envolve:
 - especificação das fracções da superfície do solo cultivadas com a cultura dominante ($f_{r\ dom}$) e com a cultura subordinada ($f_{r\ sub}$)
 - cálculo diário da altura da cultura dominante (h_{dom}) e da cultura subordinada (h_{sub})
- 3) Cálculo dos valores diários do K_{cb} da consociação ($K_{cb\ inter}$) em função dos valores diários de $K_{cb\ dom}$, $K_{cb\ sub}$, $K_{d\ dom}$ e $K_{d\ sub}$;
- 4) Cálculo dos valores diários da fracção de depleção da água do solo em conforto hídrico (p), para a cultura dominante (p_{dom}) e subordinada (p_{sub})
- 5) Cálculo dos valores diários da fracção p para a consociação (p_{inter}), tal como apresentado na Fig. 5.1 e no ponto 3.2.4 do Capítulo 3
- 6) Cálculo provisório do balanço hídrico do solo, estimando:
 - a evapotranspiração potencial: $ET_{c\ pot} = (K_{cb\ inter} + K_e) ET_o$
 - a ascensão (CR) e a percolação profunda (DP), através das equações paramétricas de Liu et al. (2006), conforme descrito no ponto 3.2.6 do Capítulo 3;
 - a depleção provisória da água do solo no fim do dia ($D_{r, i}$)
- 7) Correção do balanço hídrico do solo, estimando:
 - o coeficiente de stresse hídrico (K_s) para a consociação, com base nos valores de p_{inter} , tal como descrito no ponto 3.2.4 do Capítulo 3;
 - a evapotranspiração actual: $ET_{c\ act} = (K_s K_{cb\ inter} + K_e) ET_o$;
 - a depleção da água do solo corrigida no final do dia ($D_{r\ act, i}$)

(a)

Cálculo do K_{cb} para as consociações



$$K_{d\ dom} = f_{r\ dom} \left(\frac{1}{1 + \max(h_{dom} - h_{sub}; 0)} \right) \quad K_{d\ sub} = f_{r\ sub} \left(\frac{1}{1 + \max(h_{sub} - h_{dom}; 0)} \right)$$



$$K_{cb\ inter} = \max[K_{cb\ sub} + K_{d\ dom}(K_{cb\ dom} - K_{cb\ sub}); K_{cb\ dom} + K_{d\ sub}(K_{cb\ sub} - K_{cb\ dom})]$$

(b)

Cálculo da fracção de esgotamento da água em conforto hídrico (p)

$$p_{inter} = p_{dom} \quad \text{If } Date_{act} < Date_{plant\ sub}$$

$$p_{inter} = \frac{p_{dom} f_{c\ dom} K_{cb\ dom} + p_{sub} f_{c\ sub} K_{cb\ sub}}{f_{c\ dom} K_{cb\ dom} + f_{c\ sub} K_{cb\ sub}} \quad \text{If } Date_{plant\ sub} \leq Date_{act} \leq Date_{plant\ dom}$$

$$p_{inter} = p_{sub} \quad \text{If } Date_{act} > Date_{harv\ dom}$$

Fig. 5.1. a) Esquema da abordagem para o cálculo de: a) K_{cb} em consociações por faixas ($K_{cb\ inter}$) em função dos coeficientes de densidade (K_d) e dos coeficientes culturais basais (K_{cb}) para as culturas dominante (subscrito *dom*) e subordinada (subscrito *sub*), com K_d calculado a partir das alturas (h) e das frações de solo cultivado (f_r) para as culturas dominante (subscrito *dom*) e subordinada (subscrito *sub*); b) fracção da água extraível sem stress para consociações por faixas (p_{inter}) em função das fracções p para cultura dominante (p_{dom}) e subordinada (p_{sub}), e de $f_{r\ dom}$, $f_{r\ sub}$, $K_{cb\ dom}$ e $K_{cb\ sub}$.

As estimativas do SIMDualKc para a ET_c , T_c , e E_s em consociações T-M e T-G, bem como as produções obtidas neste sistema, podem ser comparadas com a média ponderada destas variáveis estimadas para as respectivas monoculturas, utilizando como pesos as fracções $f_{r\ dom}$ e $f_{r\ sub}$ definidas na Fig 5.1. Assim, se X_{inter} for o valor da variável X calculada para a consociação, e X_{dom} e X_{sub} forem, respectivamente, os valores dessa variável calculados para a

cultura dominante e subordinada em regime de monocultura, então X_{inter} pode ser comparado com a média ponderada X_{avg} , calculada como:

$$X_{avg} = f_{r\ dom} X_{dom} + f_{r\ sub} X_{sub} \quad (5.1)$$

Esta abordagem foi aqui aplicada para efeitos de comparação do uso da água, da ascensão capilar, $ET_{c\ act}$, $T_{c\ act}$, E_s , produção e produtividade da água (Secção 5.3.4). A produtividade da água foi definida tal como por Pereira et al. (2012).

No presente estudo os dados de entrada necessários para correr o modelo consistiram em:

- a) dados meteorológicos: precipitação (P) (mm), ET_o (mm), a velocidade do vento ($m\ s^{-1}$) e HR_{min} (%), sendo as duas últimas variáveis necessárias para ajustar o K_{cb} tabelado ou ‘padrão’ às condições climáticas locais (ver Secção 2.1).
- b) dados da culturas, comuns para quando estas são cultivadas individualmente ou em consociação: datas dos estádios de desenvolvimento; valores do K_{cb} para o período inicial e médio (*mid-season*), e no fim do ciclo, respectivamente, $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$ e $K_{cb\ end}$; fracção de depleção da água do solo em conforto hídrico, p , para cada estágio de desenvolvimento; e profundidade radicular (m), altura da cultura (m) e fracção de cobertura do solo (f_c) para as fases de desenvolvimento referidas anteriormente.
- c) Dados do solo: para cada uma das camadas do solo, a respectiva profundidade (m), o teor de água à capacidade de campo (θ_{FC} , $cm^3\ cm^{-3}$) e no coeficiente de emurchecimento (θ_{WP} , $cm^3\ cm^{-3}$);
- d) Dados da camada superficial evaporativa do solo: espessura (Z_e , m); os valores de θ_{FC} e θ_{WP} usados para calcular o total de água evaporável (TEW); e a percentagem das fracções texturais de areia e argila utilizados para estimar a água facilmente evaporável (REW);
- e) Dados da ascensão capilar: profundidade da toalha freática em várias datas ao longo do ciclo de crescimento (m) e os valores aproximados de LAI nas mesmas datas; e um conjunto de parâmetros (a_1 , b_1 , a_2 , b_2 , a_3 , b_3 , a_4 e b_4) dependentes do tipo de solo e que estabelecem limiares do armazenamento de água no solo e da profundidade da toalha freática com impacto na CR, utilizados nas equação paramétricas de Liu et al. (2006);
- f) Parâmetros da percolação profunda, a_{DP} e b_{DP} , relativos, respectivamente, a um limiar do teor de água do solo entre a θ_{FC} e θ_s , e à capacidade de drenagem do solo, tal como definido por Liu et al. (2006);
- g) Método de rega: fracção da superfície do solo humedecida pela rega f_w , que influencia o cálculo das fracções f_{ewi} e f_{ewp} por onde se ocorre a evaporação do solo (ponto 3.2.5)

- h) Dados da programação da rega: dotações de rega adoptadas e as respectivas datas;
- i) Dados das consociações de culturas: identificação das duas culturas e especificação da fracção da superfície do solo (f_r) cultivado com cada uma delas

5.2.2. Caracterização do local e dos sistemas de consociação de culturas

A área onde decorreram os ensaios de campo localiza-se perto da localidade de Dengkou, na Região Autónoma da Mongólia Interior, China, local onde as águas do Rio Amarelo superior são desviadas para o canal principal de condução da água para rega no perímetro de Hetao, um dos três maiores da China (Zhu et al., 2003; Xu et al., 2010; Yang et al., 2012). A área de estudo, com cerca de 6.5 hectares, é correntemente utilizada para vários estudos visando a introdução de melhorias dos sistemas de rega, com o objectivo de melhorar o uso e a poupança de água, como seja, por exemplo, o estudo de Miao et al. (2015) referente a uma avaliação de campo do desempenho da rega por alagamento e da poupança de água. Entre 2010 e 2012, foram realizados na área de estudo ensaios em várias parcelas (canteiros nivelados) monocultivadas com trigo, milho e girassol e regadas por alagamento para avaliar o uso da água por estas culturas; estes estudos estenderam-se também para as consociações (for faixas alternadas) trigo-milho (T-M) e trigo-girassol (T-G), em canteiros regados por alagamento na mesma área de estudo durante as estações de crescimento de 2010 e 2011.

O clima na região é definido como BWk de acordo com a classificação de Köppen (Kottek et al., 2006), com verões quentes e secos e invernos longos, secos, extremamente frios e com pouca neve, que duram de novembro a março. Os dados meteorológicos diários foram registados numa estação meteorológica automática localizada dentro da área experimental (40°13N, 107°05E, e 1048 m de altitude) e incluíram a precipitação (P), temperatura máxima (T_{\max}) e mínima (T_{\min}), e humidade relativa máxima (RH_{\max}) e mínima (RH_{\min}) do ar, velocidade do vento (u_z) e a duração total de períodos com luz solar directa por dia (n). A localização e as condições de instalação da estação meteorológica, bem como os procedimentos utilizados para averiguar a qualidade dos dados meteorológicos cumpriram as recomendações dadas por Allen (2008). Estes dados foram utilizados para calcular os valores diários da evapotranspiração de referência (ET_o) com o método FAO-PM (Allen et al., 1998). Na Fig. 5.2, apresentam-se os valores diários de T_{\max} , T_{\min} , ET_o e P no período 2010-2012. Constata-se que 2011 foi um ano muito seco, em contraste com o ano mais húmido de 2012. Os dados também mostram que a ET_o foi mais baixa em 2012.

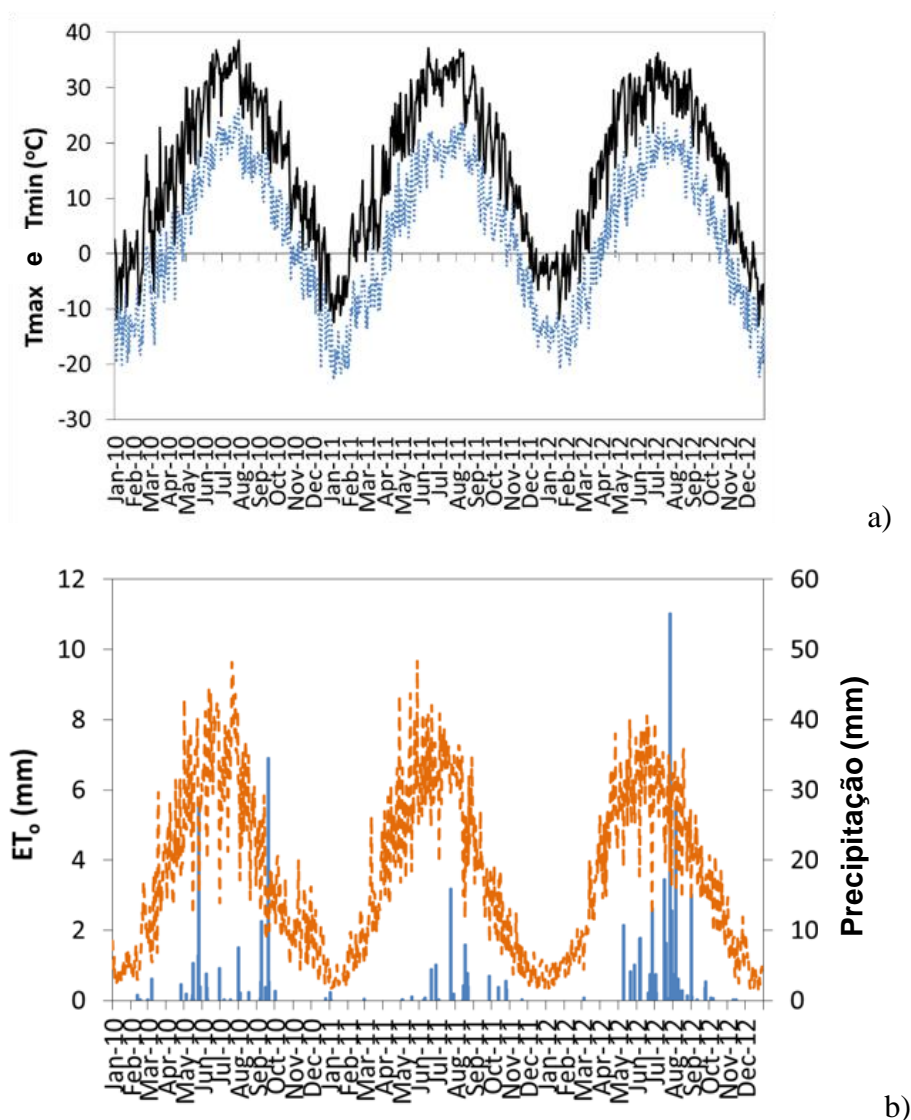


Fig. 5.2. Valores diários da temperatura mínima (.....) e máxima (—), evapotranspiração de referência (- -) e precipitação (■) em Dengkou, Hetao, durante o período 2010-2012

O solo na área experimental é classificado como um Antrossolo ‘irragrícola’ (i.e., formado a partir da deposição de sedimentos presentes na água de rega) limoso de formação antropogénica (IUSS, 2014), com textura franco-limosa até 60 cm de profundidade e argilo-limosa abaixo dos 60 cm. As propriedades hidráulicas e texturais do solo relevantes para este estudo são apresentadas na Tabela 5.1, obtidas a partir de amostragens em vários pontos da área experimental. Os dados mostram que a máxima disponibilidade de água no solo (TAW), calculada como a média ponderada de $\theta_{FC} - \theta_{WP}$ para todo o perfil do solo, aumenta com a profundidade e é em média 214 mm m^{-1} .

Tabela 5.1. Principais propriedades hidráulicas e texturais do solo na área experimental de Dengkou.

Prof. (m)	Distribuição do tamanho das partículas (%)			Densidade aparente (g cm ⁻³)	Teor de água do solo (cm ³ cm ⁻³)		
	Argila	Limo	Areia		Saturação	Capacidade de campo	Coefficiente de emurchecimento
0-0.20	23.0	76.7	0.3	1.52	0.47 (0.46-0.48)	0.36 (0.35-0.37)	0.16 (0.15-0.17)
0.20-0.40	12.1	81.6	6.3	1.49	0.48 (0.48-0.50)	0.37 (0.37-0.38)	0.16 (0.16-0.17)
0.40-0.60	14.6	84.2	1.2	1.49	0.49 (0.48-0.50)	0.37 (0.37-0.38)	0.16 (0.16-0.18)
0.60-0.80	35.1	64.9	0.0	1.45	0.50 (0.49-0.52)	0.39 (0.38-0.41)	0.17 (0.16-0.19)
0.80-1.00	42.5	57.5	0.0	1.44	0.52 (0.50-0.53)	0.41 (0.40-0.42)	0.18 (0.17-0.20)

Os ensaios de campo foram realizados para as monoculturas do trigo, milho e girassol entre 2010 e 2012, e para as consociações T-M e T-G em 2010 e 2011. Foi utilizada a variedade de trigo de primavera *Yongliang 4* (também conhecida como *Ningchun 4*), que é a mais adoptada em Hetao por proporcionar uma boa qualidade de farinha (Bai et al., 2011) e devido à boa tolerância ao stresse hídrico (Ge et al., 2012); foi adoptada uma densidade de plantação de 520 plantas m⁻² e um espaçamento entre linhas de plantação de 0.12 m. No caso do milho adoptou-se a variedade *Badan 3*, amplamente utilizada, com boa resistência a secas e com elevadas produções (Zhang et al., 2000), que foi cultivada com um sistema de linha dupla, com espaçamento entre linhas (na linha dupla) de 0.4 m e distando as plantas 0.35 m umas das outras em cada linha; o espaçamento entre cada par de linhas duplas e o par seguinte foi de 0.6 m, resultando numa densidade de plantação de 57 000 plantas ha⁻¹. Quanto ao girassol, foi utilizada a variedade T9938 (Ni, 2014), altamente produtiva, também cultivada em sistema de dupla linha distando estas de 0.5 m e com um espaçamento entre linhas duplas de 0.7 m, resultando numa densidade de plantação de 40 000 plantas ha⁻¹. Quanto às consociações, foi adoptado um esquema de vinte linhas de trigo e quatro de milho ou girassol, usando os espaçamentos entre plantas na linha, entre as linhas de cada linha dupla e entre linhas duplas, que foram utilizados para as monoculturas. Resultou assim que na consociação T-M as fracções do solo (f_r) cultivadas com trigo e milho foram, respectivamente, $f_{r \text{ trigo}} = 0.58$ e $f_{r \text{ milho}} = 0.42$, e na consociação trigo girassol, aquelas foram, respectivamente, $f_{r \text{ trigo}} = 0.54$ e $f_{r \text{ girassol}} = 0.46$.

As observações de campo incluíram as datas dos estádios de desenvolvimento das culturas preconizados por Allen et al. (1998), que se apresentam na Tabela 5.2. A altura das culturas (h) e a fracção de cobertura do solo (f_c) foram observadas em cinco locais distribuídos aleatoriamente e em várias datas ao longo dos seus ciclos de desenvolvimento. Os valores da f_c foram determinados através da inspecção visual de fotografias tiradas verticalmente acima

dos cobertos ao longo das estações de crescimento das culturas, permitindo uma razoável aproximação do verdadeiro valor de f_c . Na Tabela 5.3 apresentam-se os valores de h e f_c interpolados para as datas ‘padrão’ dos estádios de desenvolvimento das culturas preconizadas em FAO 56 (Allen et al., 1998). Não foram observadas diferenças significativas entre os valores de f_c e h do trigo, milho e girassol cultivados individualmente e quando em consociação; assim os valores dados na Tabela 5.3 correspondem à média entre os dois sistemas de cultivo, tendo sido estes valores utilizados comumente para as simulações envolvendo as monoculturas e as consociações. A profundidade radicular (Z_r) foi observada desde o início do desenvolvimento das culturas até estas atingirem a máxima cobertura (período médio - *mid-season*) através da recolha de amostras de solo com uma sonda até de 1.0 metros de profundidade em 5 locais distribuídos aleatoriamente nas parcelas com as monoculturas e em 3 locais aleatórios em cada uma das faixas nas parcelas com as consociações. As amostras de solo foram inspeccionadas visualmente para detecção da existência de raízes. As observações mostraram que para as três culturas, tanto quando monocultivadas ou em consociação, a maioria das raízes se concentraram na camada superficial de solo de 0.4 m de profundidade, embora tenham sido encontradas raízes finas até 0.8-1.0 m de profundidade. Assim, o balanço hídrico do solo foi calculado considerando $Z_r = 1.0$ m tanto para as três monoculturas como para as consociações.

Tabela 5.2. Datas dos estádios de desenvolvimento das culturas do trigo, milho e girassol.

Cultura	Ano	Estádios de desenvolvimento			
		Inicial	Crescimento rápido	Período médio	Final do ciclo
Trigo	2010	25/03-16/04	16/04-04/05	04/05-24/06	24/06-20/07
	2011	28/03-19/04	19/04-08/05	08/05-22/06	22/06-16/07
	2012	20/03-16/04	13/04-04/05	05/05-24/06	20/06-11/07
Milho	2010	21/04-20/05	20/05-30/06	30/06-20/08	20/08-21/09
	2011	26/04-23/05	23/05-01/07	01/07-22/08	22/08-24/09
	2012	26/04-20/05	20/05-30/06	30/06-20/08	20/08-16/09
Girassol	2010	25/05-20/06	20/06-20/07	20/07-30/08	30/08-23/09
	2011	28/05-23/06	23/06-25/07	25/07-31/08	31/08-24/09
	2012	01/06-25/06	25/06-23/07	23/07-29/08	29/08-16/09
Consociações					
Trigo-milho	2010 trigo	25/03-16/04	16/04-04/05	04/05-24/06	24/06-20/07
	2010 milho	21/04-20/05	20/05-30/06	30/06-20/08	20/08-21/09
	2011 trigo	28/03-19/04	19/04-08/05	08/05-22/06	22/06-16/07
	2011 milho	26/04-23/05	23/05-01/07	01/07-22/08	22/08-24/09
Trigo-girassol	2010 trigo	25/03-16/04	16/04-04/05	04/05-24/06	24/06-20/07
	2010 girassol	25/05-20/06	20/06-20/07	20/07-30/08	30/08-23/09
	2011 trigo	28/03-19/04	19/04-08/05	08/05-22/06	22/06-16/07
	2011 girassol	28/05-23/06	23/06-25/07	25/07-31/08	31/08-24/09

Tabela 5.3. Altura das culturas (h) e fracção de cobertura (f_c) às datas de início dos estádios de desenvolvimento padrão.

Cultura	Ano		Plantação	Início do período de crescimento rápido	Início do período médio	Início do período final	colheita
Trigo	2010	h (m)	0	0.15	0.80	0.83	0.80
		f_c ()	0	0.10	0.87	0.87	0.40
	2011	h (m)	0	0.13	0.78	0.82	0.80
		f_c ()	0	0.10	0.85	0.85	0.38
	2012	h (m)	0	0.12	0.82	0.84	0.81
		f_c ()	0	0.10	0.86	0.86	0.41
Milho	2010	h (m)	0	0.27	1.97	2.00	1.94
		f_c ()	0	0.10	0.90	0.90	0.45
	2011	h (m)	0	0.21	1.91	1.95	1.90
		f_c ()	0	0.10	0.88	0.90	0.41
	2012	h (m)	0	0.25	1.99	2.05	1.99
		f_c ()	0	0.10	0.93	0.93	0.43
Girassol	2010	h (m)	0	0.16	1.91	1.95	1.90
		f_c ()	0	0.10	0.85	0.85	0.39
	2011	h (m)	0	0.14	1.89	1.94	1.89
		f_c ()	0	0.10	0.87	0.87	0.42
	2012	h (m)	0	0.17	1.94	1.96	1.93
		f_c ()	0	0.10	0.87	0.88	0.40

Foi usada rega por canteiros com nivelamento de precisão. As parcelas/canteiros com as monoculturas tinham uma dimensão de 10 x 50 metros e a rega foi efectuada por derivação de água a partir de um canal de distribuição, sendo a dotação de rega medida com um descarregador trapezoidal de fluxo livre. Diferentemente, as consociações foram cultivadas em várias canteiros de pequenas dimensões e contíguos, cada um com 4.3 ou 4.7 m de largura e 8 m de comprimento e separados por marachas (muretes) de terra, sendo a água para rega bombeada a partir de um canal terciário; os volumes aplicados foram medidos com caudalímetros instalados no tubo de saída da bomba. As datas de rega foram definidas de acordo com o calendário de distribuição de água ao canal do sector, seguindo portanto as decisões de gestão relativas ao canal de Dengkou. As dotações de rega aplicadas ao longo do ciclo de desenvolvimento das monoculturas e consociações apresentam-se na Tabela 5.4. Faz-se notar que foi ainda aplicada uma rega outonal, no início de Novembro, antes do solo gelar, com uma dotação média de 220 mm em 2010, 204 mm em 2011 e 177 mm em 2012. Esta rega é sempre aplicada para a lavagem dos sais e para melhorar a estrutura, a infiltração e a conductividade hidráulica destes solos limosos sujeitos a sucessivos períodos de congelação e de degelo (Sillanpää e Webber, 1961;. Qi et al, 2006;. Li et al, 2012). A ocorrência destes

períodos vai de meados de Novembro até Abril e atinge profundidades de cerca de 1.1 metros de profundidade (Wang e Akae, 2004; Feng et al, 2005; Li et al, 2012).

Tabela 5.4. Número de regas e volume total de rega aplicado para cada uma das monoculturas e para as duas consociações.

Ano	Cultura	Número de regas	Volume total (mm)
2010	Trigo	3	285
	Milho	4	427
	Girassol	3 ⁽¹⁾	291
	Trigo-Milho	5	485
	Trigo-girassol	4	388
2011	Trigo	3	295
	Milho	4	411
	Girassol	4 ⁽¹⁾	389
	Trigo-Milho	5	485
	Trigo-girassol	4	388
2012	Trigo	3	288
	Milho	3	325
	Girassol	3 ⁽¹⁾	286

⁽¹⁾ A primeira rega foi aplicada antes da cultura ser semeada

O teor de água do solo (SWC) foi medido com recurso ao método gravimétrico. Aproximadamente de 10 em 10 dias foram colhidas amostras de solo a várias profundidades, com incrementos de 0.1 m até 1.0 metros de profundidade e com três repetições. Nas parcelas monocultivadas as amostras foram colhidas em dois locais, situados a 15 m das extremidades montante e jusante da parcela, enquanto nos canteiros com as consociações a amostragem foi feita no centro dos canteiros e sob as linhas com cada uma das culturas consociadas. Contrariamente a outras zonas do perímetro de rega de Hetao, a salinidade do solo não é um problema em Dengkou, onde a condutividade eléctrica do extracto de saturação do solo, EC_e , medida em vários locais ao longo das estações de crescimento de 2010 a 2012, variou entre 0.11 a 1.58 dS m⁻¹. O valor limite da EC_e (que desencadeia o stresse osmótico) apresentado em FAO 56 (Allen et al., 1998,) relativamente às culturas consideradas é maior do que o valor máximo observado de EC_e , indicando assim que as culturas não foram afectadas pela salinidade.

A profundidade da toalha freática (D_{wt}) foi medida utilizando um sensor electrónico do nível da água (KGU9901, Chongqin Shanlan, China) com 5 a 7 dias de intervalo durante as estações de crescimento das culturas, estando o poço de observação localizado no interior da área experimental. A profundidade da toalha freática para o período 2010-2012 (Fig. 5.3) variou entre 0.73 m, durante o período de máxima necessidade de rega, e 2.29 m no final da

campanha de rega. Pode observar-se que o nível da toalha freática apresenta uma flutuação em resposta às regas aplicadas na área.

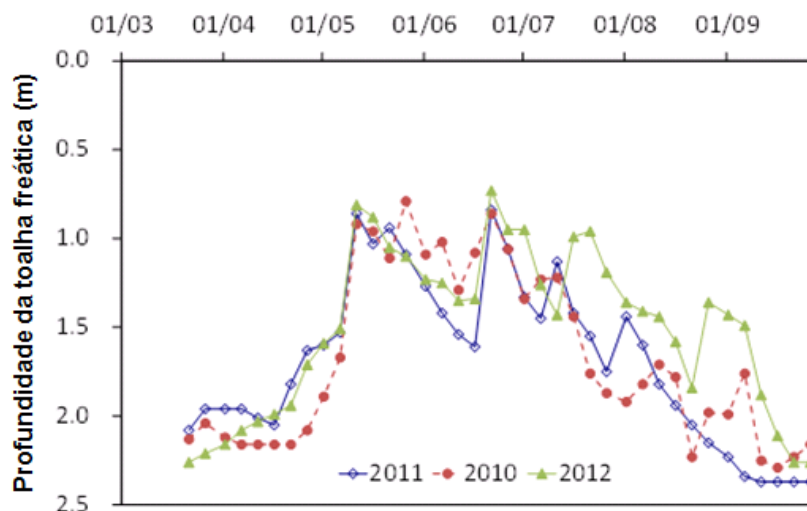


Fig. 5.3. Variação temporal da profundidade da toalha freática para as estações de crescimento de 2010 a 2012

5.2.3. Calibração e validação do modelo; indicadores de ajustamento

A calibração do modelo, i.e., o ajustamento dos seus parâmetros, dentro de limites razoáveis para a sua variação, para que os resultados do modelo sejam consistentes com a realidade ou com os dados observados disponíveis (Moriasi et al., 2007; Pereira et al.; 2015), foi efectuada apenas para as monoculturas do trigo, milho e girassol, utilizando os dados experimentais obtidos em 2010. O modelo não foi calibrado para as consociações, uma vez que a abordagem seguida baseia-se na combinação de parâmetros já calibrados para as duas culturas consociadas quando cultivadas individualmente, tal como se pode constatar na Fig 5.3 e nas Eqs. 3.6, 3.7 e 3.11 do Capítulo 3. A validação do modelo para as monoculturas foi efectuada comparando os resultados do modelo, obtidos com os parâmetros já calibrados, com dados observados independentes das estações de desenvolvimento de 2011 e 2012. No caso das consociações, a validação foi realizada para ambas as estações de crescimento de 2010 e 2011 utilizando os valores calibrados de K_{cb} , K_d e p para as monoculturas, respectivamente, nas Eqs. 3.6, 3.7 e 3.11 do Capítulo 3 (Fig. 5.3), assumindo o trigo como a cultura dominante em ambas as consociações T-M e T-G. Foram também usados os parâmetros previamente calibrados da evaporação do solo, da ascensão capilar (CR) e da percolação profunda (DP).

O procedimento de calibração consistiu num ajustamento iterativo dos parâmetros K_{cb} e p das culturas e dos parâmetros Z_e , TEW e REW da evaporação do solo, adoptando à partida os

valores propostos por Allen et al. (1998), bem como dos parâmetros da CR e da DP, começando com os valores propostos por Liu et al. (2006) para o tipo de solo ‘modelo’ mais próximo do da área experimental. Este procedimento de tentativa e erro procurou minimizar as diferenças entre os valores simulados e observados da água disponível no solo (ASW). O procedimento foi em primeiro lugar utilizado para ajustar progressivamente os valores de K_{cb} e p , cuja variação foi restringida a um intervalo de amplitude 0.10-0.15 relativamente aos valores padrão. A simples visualização dos sucessivos valores de ASW simulados quando comparados com os valores observados de ASW constituiu a parte fundamental do processo de ajustamento. Para além disso, a cada iteração foi calculado o erro quadrático médio (RMSE) visando obter valores de RMSE sucessivamente menores nas iterações seguintes. Quando as alterações do RMSE se tornaram muito pequenas, o processo iterativo passou a focar-se no ajustamento dos parâmetros da CR e da DP até se atingir um valor mínimo de RMSE. De seguida, os parâmetros Z_e , TEW e REW foram novamente ajustados e mais tarde o procedimento iterativo voltou a ser aplicado aos parâmetros K_{cb} e p , ficando finalmente todos os parâmetros definitivamente definidos quando os valores de RMSE praticamente não se alteraram de uma iteração para a seguinte.

A consistência e a fiabilidade dos valores simulados da ASW obtidos na calibração e validação do modelo foram avaliadas recorrendo a indicadores da qualidade do ajustamento, sendo a utilização destes discutida em detalhe por Pereira et al. (2015). Esta avaliação foi realizada em primeiro lugar pela análise da representação gráfica dos valores simulados vs. observados da ASW, o que permitiu uma boa percepção das tendências ou enviesamentos na modelação. O coeficiente b_0 da recta de regressão forçada à origem (Eisenhauer, 2003) relacionando os valores de ASW observados e previstos pelo modelo foi usado para perceber o grau de semelhança dos dois conjuntos de valores de ASW, e portanto para identificar possíveis tendências na modelação. O coeficiente de determinação (R^2), da regressão pelo método dos mínimos quadrados, aplicada aos mesmos conjuntos de dados foi utilizado como indicador da dispersão dos pares de valores em torno da recta de regressão, i.e., da percentagem da variabilidade total dos dados observados que é explicada pelo modelo. Outros indicadores estatísticos, aqui utilizados e definidos por Moriasi et al. (2007) e Pereira et al. (2015), para além dos já definidos no Capítulo 4, i.e., o erro quadrático médio (RMSE, mm), o erro relativo médio (ARE, mm), e a eficiência da modelação (EF), foram os seguintes:

- (a) A razão RSR entre o RMSE e o desvio padrão dos dados observados (sd) que padroniza o RMSE, que varia entre um valor ótimo de 0.0 e um valor positivo elevado, indicando que quanto menor é RSR melhor é o desempenho do modelo.
- (b) O enviesamento percentual (PBIAS,%), que mede a tendência dos dados simulados serem superiores ou inferiores às correspondentes observações. Valores positivos indicam um desvio por defeito e valores negativos indicam um desvio por excesso. O valor ideal é PBIAS = 0.0 e valores baixos de PBIAS indicam uma simulação precisa.

5.3. Resultados e discussão

5.3.1. Calibração e validação do modelo para as monoculturas

Os valores ‘padrão’ de K_{cb} e p propostos em FAO-56 (Allen et al., 1998) para o trigo de primavera, milho e girassol foram utilizados para iniciar o procedimento de calibração do modelo depois de serem ajustados para as condições climáticas locais (Allen et al., 1998). Os valores iniciais dos parâmetros da evaporação do solo foram $Z_e = 0.1$ m, $TEW = 28$ mm e $REW = 10$ mm, com TEW e REW calculados, respectivamente, a partir dos valores de θ_{FC} e θ_{WP} , e das características texturais, da camada superficial evaporativa do solo (Tabela 5.1), de acordo com Allen et al. (1998, 2005). Os parâmetros iniciais das equações paramétricas para o cálculo de CR e DP foram os propostos por Liu et al. (2006) para solos franco-limosos. Todos os parâmetros iniciais (padrão) e calibrados são apresentados na Tabela 5.5.

Os valores calibrados de K_{cb} e p (Tabela 5.5) são próximos dos propostos por Allen et al. (1998). No entanto, os valores calibrados de $K_{cb\ ini}$ são inferiores aos valores padrão recomendados para o estágio inicial, quando o solo está descoberto (sem vegetação), uma vez que a superfície do solo se apresentava seca e os fluxos evaporativos foram principalmente consequência da evaporação residual originada nas camadas inferiores do solo. Os valores calibrados de $K_{cb\ end}$ são semelhante aos valores padrão propostos por (Allen et al., 1998). O valor calibrado de $K_{cb\ mid}$ para o trigo é semelhante ao relatado por Zhao et al. (2013) num estudo realizado nas grandes planícies do norte da China mas maior do que o encontrado por Rosa et al. (2012b) na Síria. Assumindo $K_{c\ mid} = K_{cb\ mid} + 0,05$, tal como proposto por Allen et al. (1998), o valor calibrado de $K_{cb\ mid}$ está próximo dos valores reportados por Kjaergaard et al. (2008), Ko et al. (2009), Lopez-Urrea et al. (2009) e Gao et al. (2009), este último respeitante não ao trigo de primavera mas ao trigo de inverno nas grandes planícies do norte da China. Os valores calibrados de $K_{cb\ mid}$ para o milho são semelhantes aos reportados para as grandes planícies do norte da China (Zhao et al., 2013), Brasil (Martins et al., 2013) e

Portugal (Paredes et al., 2014). Também é comparável com os valores de $K_{c\ mid}$ reportados por Gao et al. (2009) para as planícies do Norte da China. O valor calibrado de $K_{cb\ mid}$ para o girassol é compatível com os valores de $K_{c\ mid}$ relatados por Karam et al. (2007), Lopez-Urrea et al. (2014) e Sanchez et al. (2014).

Tabela 5.5. valores iniciais e calibrados dos coeficientes culturais basais (K_{cb}), fração de depleção da água do solo em conforto hídrico (p), parâmetros de evaporação do solo (Z_e , TEW e REW) e parâmetros da ascensão capilar e da percolação profunda.

		Iniciais			Calibrados		
		Trigo	Milho	Girassol	Trigo	Milho	Girassol
Parâmetros da cultura ^[1]	$K_{cb\ ini}$	0.15	0.15	0.15	0.10	0.10	0.10
	$K_{cb\ mid}$	1.20	1.23	1.13	1.15	1.15	1.15
	$K_{cb\ end}$	0.20	0.20	0.25	0.25	0.25	0.25
	$p\ ini$	0.55	0.55	0.45	0.55	0.55	0.50
	$p\ mid$	0.55	0.55	0.45	0.45	0.45	0.45
	$p\ end$	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
Parâmetros da evaporação do solo ^[1]	Z_e		0.10			0.15	
	TEW		28			42	
	REW		10			10	
Parâmetros da ascensão capilar ^[1]	a_1		380			380	
	b_1		-0.17			-0.17	
	a_2		300			310	
	b_2		-0.27			-0.27	
	a_3		-1.3			-1.3	
	b_3		6.6			6.6	
	a_4		4.6			4.6	
	b_4		-0.65			-0.65	
Parâmetros da percolação profunda ^[1]	a_{DP}		420			410/380 ^[2]	
	b_{DP}		-0.0173			-0.0173	

^[1] $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$ e $K_{cb\ end}$ – coeficientes culturais de base para as fases inicial, intermédia e final de crescimento; p_{ini} , p_{mid} e p_{end} – fracções de depleção da água do solo em conforto hídrico relativas às fases inicial, intermédia e final de crescimento; Z_e – profundidade da camada evaporativa (m), TEW – total de água evaporável (mm), REW – água facilmente evaporável (mm); a_{DP} (mm) e b_{DP} são os parâmetros da função percolação profunda (Liu et al., 2006); a_1 (mm), b_1 , a_2 (mm), b_2 , a_3 , b_3 , a_4 e b_4 são parâmetros empíricos da equação da ascensão capilar e variam de acordo com o tipo de solo, conforme indicado em Liu et al. (2006)

^[2] Diferentes valores calibrados de a_{DP} devem-se à heterogeneidade espacial do solo entre as várias parcelas experimentais.

As dinâmicas da água disponível no solo (ASW) ao longo dos ciclos de desenvolvimento de 2010 e 2011 quando simuladas com os parâmetros calibrados é apresentada na Fig. 5.4. A figura mostra que os valores observados de ASW apresentaram uma grande amplitude de variação ao longo de todas as estações de crescimento, e que a ASW simulada seguiu de perto a ASW observada, sem que nenhuma tendência na modelação seja notória.

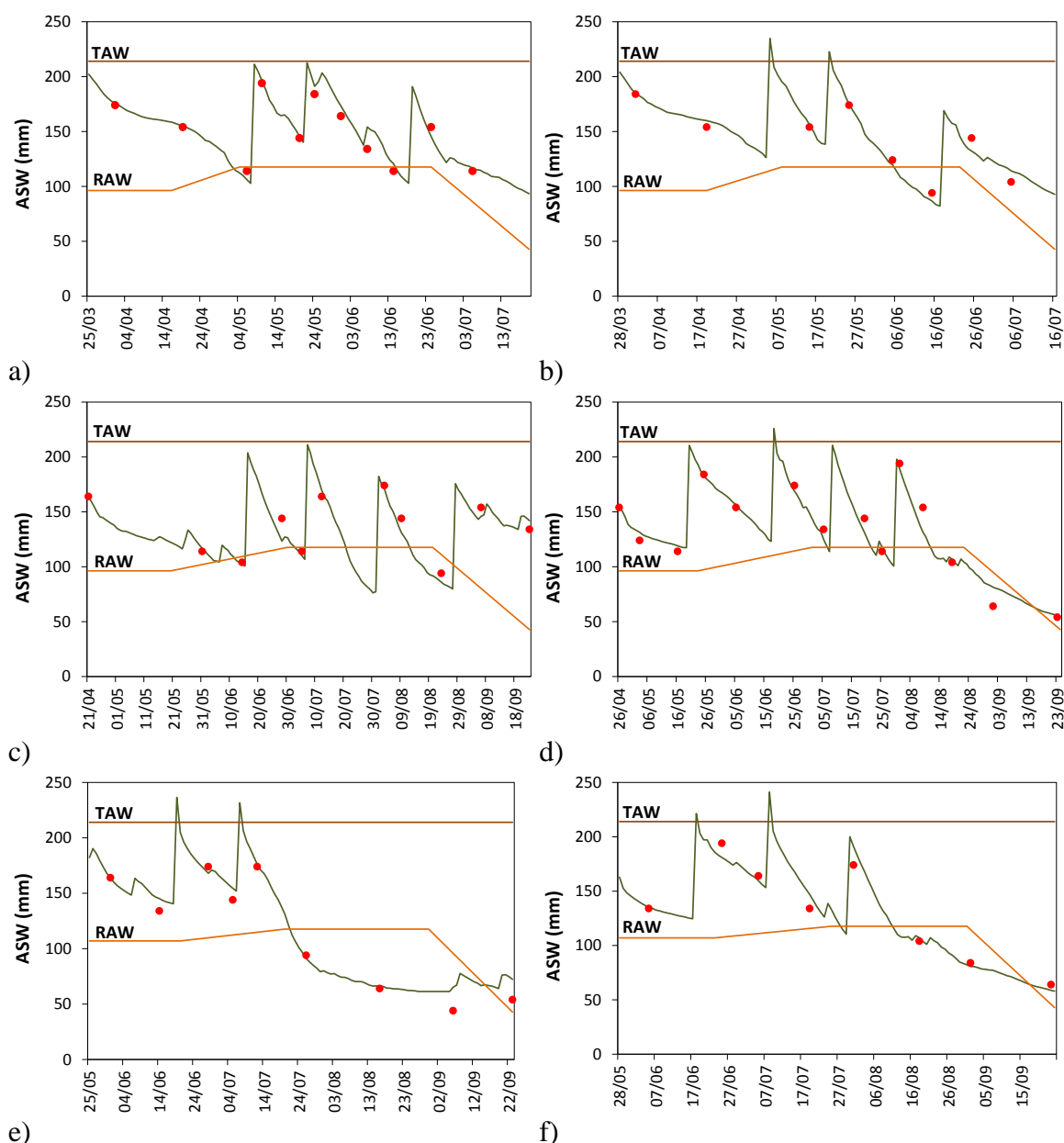


Fig. 5.4. Água disponível no solo (mm) simulada (—) vs. observada (●) para as monoculturas do trigo (a, b), milho (c, d) e girassol (e, f). Os resultados referem-se à calibração em 2010 (a, c, e) e à validação em 2011 (b, d, f).

Os indicadores da qualidade do ajustamento relativos à simulação da ASW apresentam-se na Tabela 5.6. Em geral, os valores do coeficiente da regressão (b_0) são próximos de 1.0 para todas as culturas, indicando que os valores previstos da ASW se encontram estatisticamente próximos dos observados, apesar de no caso do girassol os resultados mostrarem uma ligeira tendência para a sobrestimação de ASW observada. Os valores de R^2 são elevados, variando de 0.91 a 0.97, mostrando que o modelo explica em grande parte a variabilidade total dos dados observados. Os erros de estimação são baixos, com RMSE variando 5.8-16.4 mm para todas as culturas e estações de crescimento, sendo o seu valor normalizado (relativo), RSR,

também pequeno, variando 0.06-0.14, mostrando assim um bom desempenho do modelo em prever a ASW observada. No geral os valores de ARE também são baixos, inferiores a 5% no caso do trigo, ligeiramente superiores para o milho ($\leq 9\%$), e não excedendo os 19% para o girassol. O PBIAS foi próximo de zero para o trigo (-0,3%) e para o milho (-0,7%), demonstrando a inexistência de alguma tendência para o modelo sobrestimar ou subestimar a ASW para as monoculturas; no entanto, para o girassol, o valor médio de PBIAS = -5,8% mostrou uma ligeira tendência para o modelo sobrestimar a ASW observada, principalmente em 2012 (PBIAS = -10,7%). A eficiência da modelação foi elevada para todas as culturas e estações de crescimento ($EF \geq 0,86$), indicando assim que, em geral, a variância dos resíduos foi muito menor do que a variância dos dados observados. Pode pois concluir-se que, devidamente calibrado, o modelo descreveu bem as dinâmicas do uso da água pelas três principais culturas em Hetao.

Tabela 5.6. Indicadores da qualidade do ajustamento das previsões da ASW ao longo dos ciclos de desenvolvimento das monoculturas do trigo, milho e girassol referentes à calibração (2010) e à validação (2011 e 2012)

Cultura	Ano	b_0	R^2	RMSE (mm)	RSR	PBIAS (%)	ARE (%)	EF
Trigo	2010	1.02	0.93	8.2	0.09	-2.20	4.4	0.91
	2011	1.00	0.96	6.7	0.08	0.28	4.5	0.95
	2012	1.00	0.94	5.8	0.07	-0.03	3.1	0.94
Milho	2010	0.97	0.91	8.8	0.10	2.69	5.0	0.88
	2011	0.98	0.95	9.4	0.06	0.75	6.1	0.94
	2012	1.04	0.95	12.0	0.09	-5.60	9.3	0.90
Girassol	2010	1.03	0.98	10.9	0.07	-5.40	12.2	0.95
	2011	1.01	0.96	9.4	0.08	-0.84	5.7	0.95
	2012	1.07	0.95	16.4	0.14	-10.7	18.9	0.87

b_0 e R^2 são os coeficientes de regressão e determinação, respectivamente; RMSE é a raiz do erro médio quadrático; RSR é a razão entre RMSE e o desvio padrão dos dados observados; PBIAS é a tendenciosidade percentual; ARE é o erro relativo médio; e EF a eficiência do modelo

5.3.2. Validação do modelo para as consociações de culturas

Os valores calibrados e validados do K_{cb} do trigo, milho e girassol em monocultura (Tabela 5.5), juntamente com a fracção da superfície do solo cultivada com cada uma das culturas ($f_{r\text{ dom}}$ ou $f_{r\text{ sub}}$) e a altura destas (h), foram usados nas Eqs. 3.6 e 3.7 do Capítulo 3, para calcular os valores de $K_{cb\text{ inter}}$ para as consociações T-M e T-G (Fig. 5.3). A equação de cálculo do $K_{c\text{ binter}}$ é aplicada diariamente aquando da execução do modelo, por isso os valores diários de $K_{cb\text{ inter}}$ são calculados com base nos valores diários de K_{cb} e K_d das correspondentes

culturas consociadas. Como exemplo, as curvas de $K_{cb\ inter}$ para as consociações T-M e T-G em 2010 são apresentadas na Fig. 5.5 em conjunto com as curvas do K_{cb} das duas culturas consociadas quando cultivadas isoladamente.

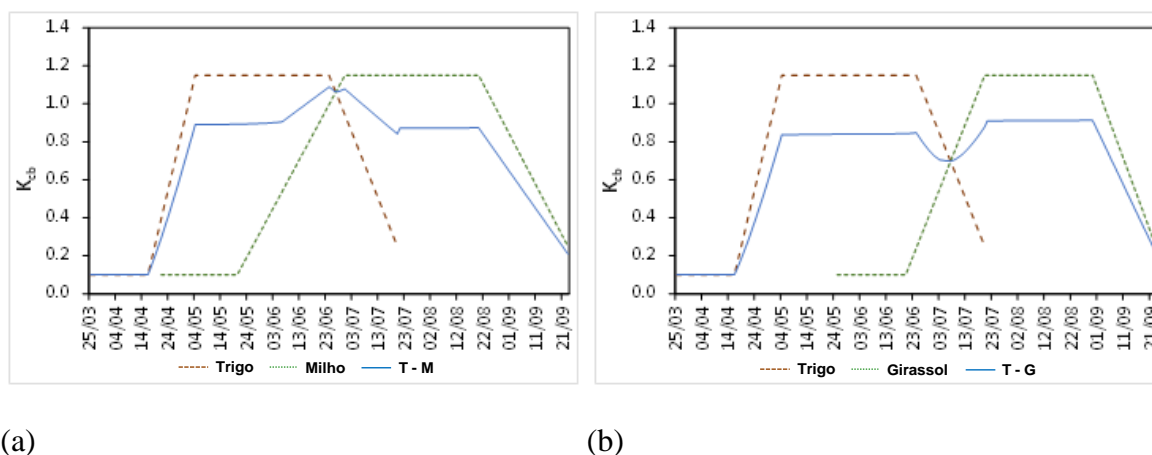


Fig. 5.5. Comparação das curvas do K_{cb} relativas às monoculturas do trigo , milho e girassol, com as curvas relativas às consociações: a) trigo-milho (T-M) e b) trigo-girassol (T-G) (estação de crescimento de 2010).

Pode constatar-se na Fig. 5.5a que o valor de K_{cb} para a consociação T-M ($K_{cb\ inter}$) se manteve praticamente constante durante a fase média de crescimento do trigo, $K_{cb\ inter} \approx 0.89$, altura em que o milho se encontrava numa fase muito precoce do seu desenvolvimento, ou seja, quando $h_{maize} \ll h_{wheat}$ e $K_{cb\ milho} \ll K_{cb\ trigo}$. Posteriormente, $K_{cb\ inter}$ começa a aumentar de 0.89 até 1.08 quando $h_{milho} > h_{trigo}$, ou seja, quando os valores do K_{cb} do trigo e do milho se encontram perto dos seus valores máximos. O valor máximo de $K_{cb\ inter}$ e a sua duração variam com as datas do começo da senescência do trigo e o do máximo desenvolvimento do milho, ou seja, de acordo com a gestão das culturas e com o clima. Após esse ‘pico’ de curta duração, o valor de $K_{cb\ inter}$ começa a decrescer devido à senescência do trigo, altura em que $K_{cb\ milho} > K_{cb\ trigo}$. Quando o trigo é colhido $K_{cb\ inter}$ passa a ser regido apenas pelo milho, resultando em $K_{cb\ inter} \approx 0.87$ durante o estágio médio do milho, passando depois a decrescer durante a senescência do milho até à colheita.

No caso da consociação T-G (figura 5.5b), $K_{cb\ inter} \approx 0.84$ durante todo o estágio médio do trigo, diminuindo depois para 0.70 durante a senescência do trigo, enquanto $K_{cb\ girassol} < K_{cb\ trigo}$. O valor de $K_{cb\ inter}$ passa depois a crescer rapidamente quando $K_{cb\ girassol} > K_{cb\ trigo}$, atingindo $K_{cb\ inter} \approx 0.91$ durante o estágio médio do girassol. No fase final do ciclo do girassol $K_{cb\ inter}$ diminui acompanhando a senescência do girassol até à sua colheita.

A abordagem descrita acima foi testada/validada para ambas as consociações utilizando os dados experimentais observados em 2010 e 2011 e utilizando os parâmetros calibrados da cultura, do solo, da CR e da DP apresentados na Tabela 5.5. Na Fig. 5.6 são apresentados alguns exemplos da simulação das dinâmicas da ASW nas consociações T-M e T-G em comparação com os valores observados de ASW. Os resultados mostram que o modelo teve um bom desempenho em simular a ASW observada, sem tendências perceptíveis para a sobrestimação ou subestimação daquela.

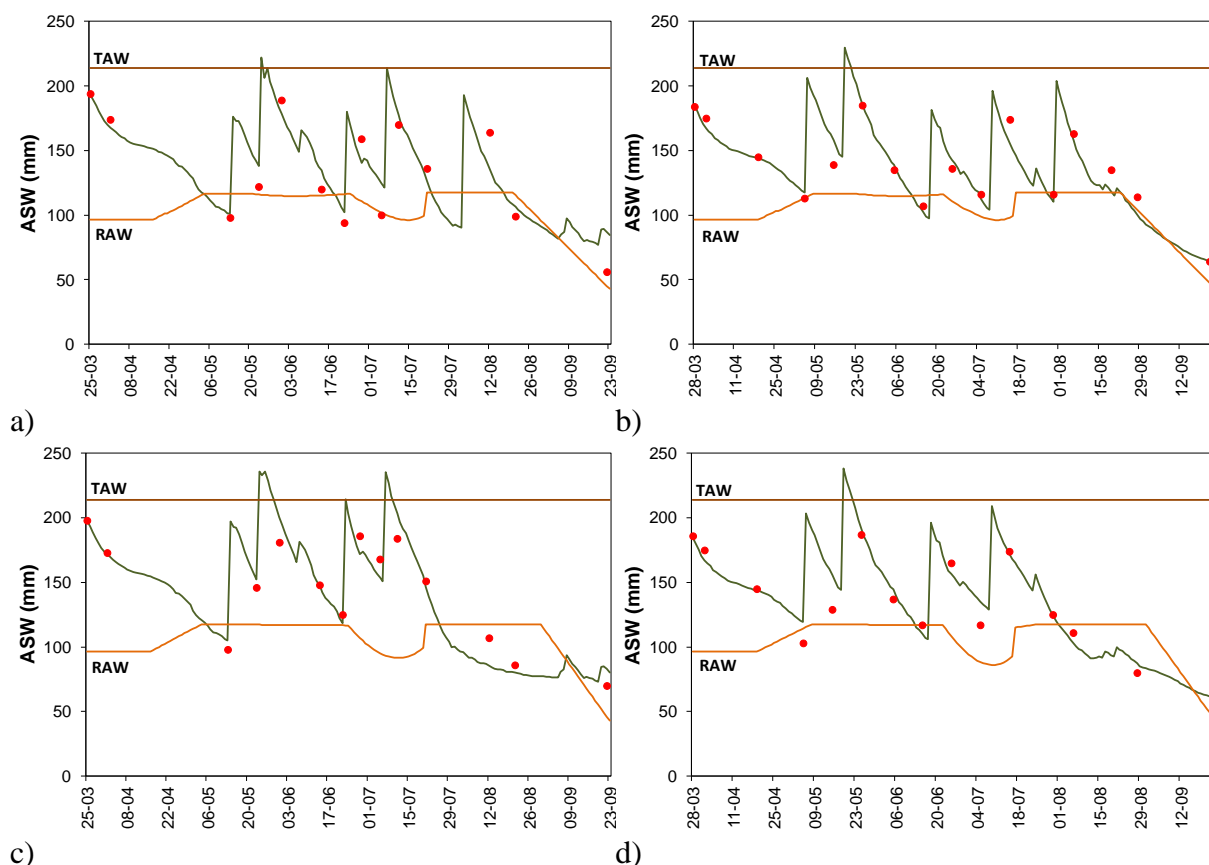


Fig. 5.6. Variação sazonal da água disponível no solo (mm) simulada(—) vs. observada (•) para a consociação trigo-milho (T-M) em 2010 (a) e 2011 (b) e para trigo-girassol (T-G) em 2010 (c) e 2011 (d).

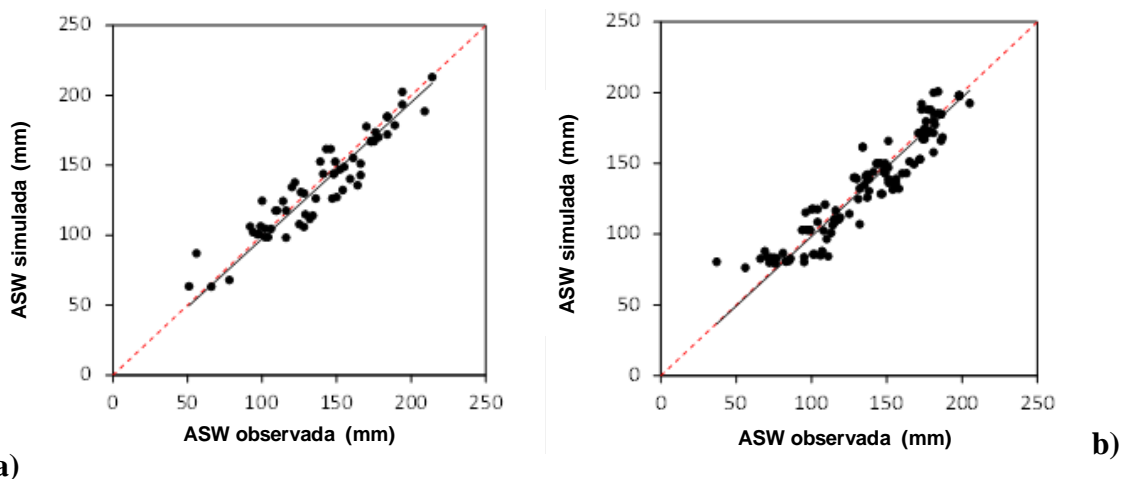


Fig. 5.7. ASW observada vs. simulada relativa a: (a) consociação trigo-milho ($n = 62$), e (b) consociação trigo-girassol ($n = 128$) (a linha a tracejado corresponde à recta 1:1).

Os indicadores da qualidade do ajustamento das simulações da ASW em 2010 e 2011 apresentadas na Fig. 5.6 com os respectivos valores observados, bem como os referentes a outras simulações e respectivas observações realizadas noutras parcelas são apresentados na Tabela 5.7. Os coeficientes de regressão (b_0) encontram-se próximos de 1.0 para todas as simulações realizadas para as consociações T-M e T-G, indicando assim que os valores previstos da ASW são próximos dos observados. Os valores de R^2 são elevados, acima de 0.86, mostrando que grande parte da variabilidade total dos dados observados é explicada pelo modelo. A Fig. 5.7 mostra as regressões entre os valores de ASW simulados e observados para todas as consociações T-M e T-G, mostrando que as rectas de regressão estão próximas da linha 1:1 e que a variância dos resíduos é pequena, com $R^2 \approx 0.90$ para ambas as consociações. Os erros de estimação são em geral ligeiramente maiores do que os obtidos em monocultura tanto em 2010 como em 2011. RMSE variou 9.4-16.1 mm, o que representa menos de 8% de TAW. Os valores de RSR são baixos, menores do que 0.11, indicando um bom desempenho do modelo. Os valores de PBIAS também são pequenos, variando entre -2.3 e 1.9, indicando assim a ausência de tendências significativas para a subestimação ou sobrestimação dos valores observados. A eficiência da modelação é alta ($EF \geq 0.84$), indicando assim que, tal como para as simulações em monocultura, a variância dos resíduos foi muito menor do que a variância dos dados observados. Os resultados globais mostram que a abordagem implementada no modelo SIMDualKc e aqui apresentada é apropriada para simular o uso da água em consociações de culturas se os parâmetros do modelo forem devidamente calibrados.

Tabela 5.7. Indicadores da qualidade do ajustamento relativos à ASW nas consociações Trigo-Milho e Trigo-Girassol durante os ciclos de desenvolvimento de 2010 e 2011.

Cultura	Ano	n	b ₀	R ²	RMSE (mm)	RSR	PBIAS (%)	ARE (%)	EF
W-M	2010	14	1.00	0.87	15.7	0.10	-2.0	12.2	0.85
	2011	16	1.03	0.92	10.4	0.08	-3.0	5.5	0.89
	4 tratamentos adicionais (intervalo de valores)	48	1.00-1.01	0.91-0.94	9.1-12.4	0.06-0.09	-1.5 a 0.6	6.1-7.3	0.86-0.93
W-S	2010	14	1.00	0.92	11.7	0.08	0.30	7.1	0.91
	2011	15	1.00	0.79	14.7	0.12	-0.36	8.2	0.78
	8 tratamentos adicionais (intervalo de valores)	114	0.96-1.04	0.74-0.95	9.1-17.8	0.06-0.14	-6.5 a 3.9	6.3-13.3	0.71-0.95

Nota: b_0 e R^2 são os coeficientes de regressão e determinação, respectivamente; RMSE é a raiz do erro médio quadrático; RSR é a razão entre RMSE e o desvio padrão dos dados observados; PBIAS é a tendenciosidade percentual; ARE é o erro relativo médio; e EF a eficiência do modelo

5.3.3. Coeficientes culturais duais e uso da água em trigo, milho e girassol

Na Fig. 5.8 apresentam-se as curvas de K_e , K_{cb} e $K_{cb\ act}$ para as monoculturas do trigo, milho e girassol, bem como a P, a rega e a CR. O K_e apresenta poucos mas elevados ‘picos’ para todas as culturas e estações na fase inicial de desenvolvimento, quando a f_c é ainda bastante reduzida e a energia disponível à superfície do solo para evaporação é máxima. O primeiro desses picos é devido à rega outonal, anterior à sementeira. Durante a fase de crescimento rápido os picos de K_e foram mais baixos e em menor número, excepto no caso do milho em 2010 (Fig. 5.8c), onde algumas chuvas e uma rega provocaram um maior número de picos no K_e . Mais tarde, durante o período intermédio e na fase final do ciclo de desenvolvimento os picos do K_e foram muito menores, devido à maior f_c , que é quase total durante o período médio. As diferenças entre culturas são pequenas, relacionando-se principalmente com as datas de sementeira e das fases de crescimento das culturas. Para as três culturas, o comportamento da curva de K_e é típico de um clima seco, com P escassa e onde as dotações de rega são elevadas e pouco frequentes, como acontece em geral em rega de superfície.

Observando as curvas de K_{cb} e $K_{cb\ act}$ para a cultura do trigo (Fig. 5.8a, b) pode notar-se que estas foram coincidentes durante a maior parte das estações de crescimento de 2010 e 2011, excepto nas proximidades da primeira e da terceira regas em 2010 e da terceira rega em 2011. Estas diferenças denotam a ocorrência de stresse hídrico, porque referidas regas foram aplicadas demasiado tarde. Para a cultura do milho (Fig. 5.8c, d), a curva de $K_{cb\ act}$ esteve mais vezes abaixo da curva do K_{cb} , indicando assim uma maior incidência de stresse hídrico

uma vez que a maior parte das regas foi programada com um atraso relativamente às necessidades da cultura, e faltou claramente uma última rega em 2011. Por outro lado, no caso do girassol em 2010, a cultura esteve sob stresse hídrico durante todo o período médio (Fig. 5.8e), porque faltou uma terceira rega, enquanto em 2011 (Fig. 5.8f) o stresse hídrico foi deliberadamente imposto durante a segunda metade do período médio e durante a fase final do ciclo de desenvolvimento (*late-season*) por forma a evitar a podridão-de-esclerotínia assim como a acama das plantas.

Em geral, os resultados na Fig. 5.8 mostram que a programação da rega não se destinou a maximizar as produções nem a praticar uma rega deficitária racional, i.e., a fazer coincidir as condições de stresse hídrico com os períodos de menor sensibilidade das culturas. Os dados na Fig. 5.8 mostram que, em vez disso, o défice hídrico ocorreu durante o período médio, quando a formação da produção estava em curso, porque as regas foram aplicadas quando os gestores do canal decidiram fazer chegar a água à área agrícola de Dengkou. A ascensão capilar a partir da toalha freática compensou em parte o défice de rega, representando 21 a 33% do valor de $ET_{c\ act}$, embora esta contribuição tenha sido insuficiente durante os períodos de maior procura evaporativa em que a depleção da água do solo foi elevada. Estes resultados mostram a necessidade de um estudo específico dirigido a encontrar as melhores alternativas para a programação da rega, que leve em consideração as políticas de poupança de água implementadas pelos gestores do canal e os impactos da redução da profundidade da toalha freática como consequência da aplicação dessas medidas de poupança de água, conforme já analisado por Xu et al. (2010, 2011) em Hetao e por Pereira et al. (2007) e Xu et al. (2013) para o projecto de rega de Huinong.

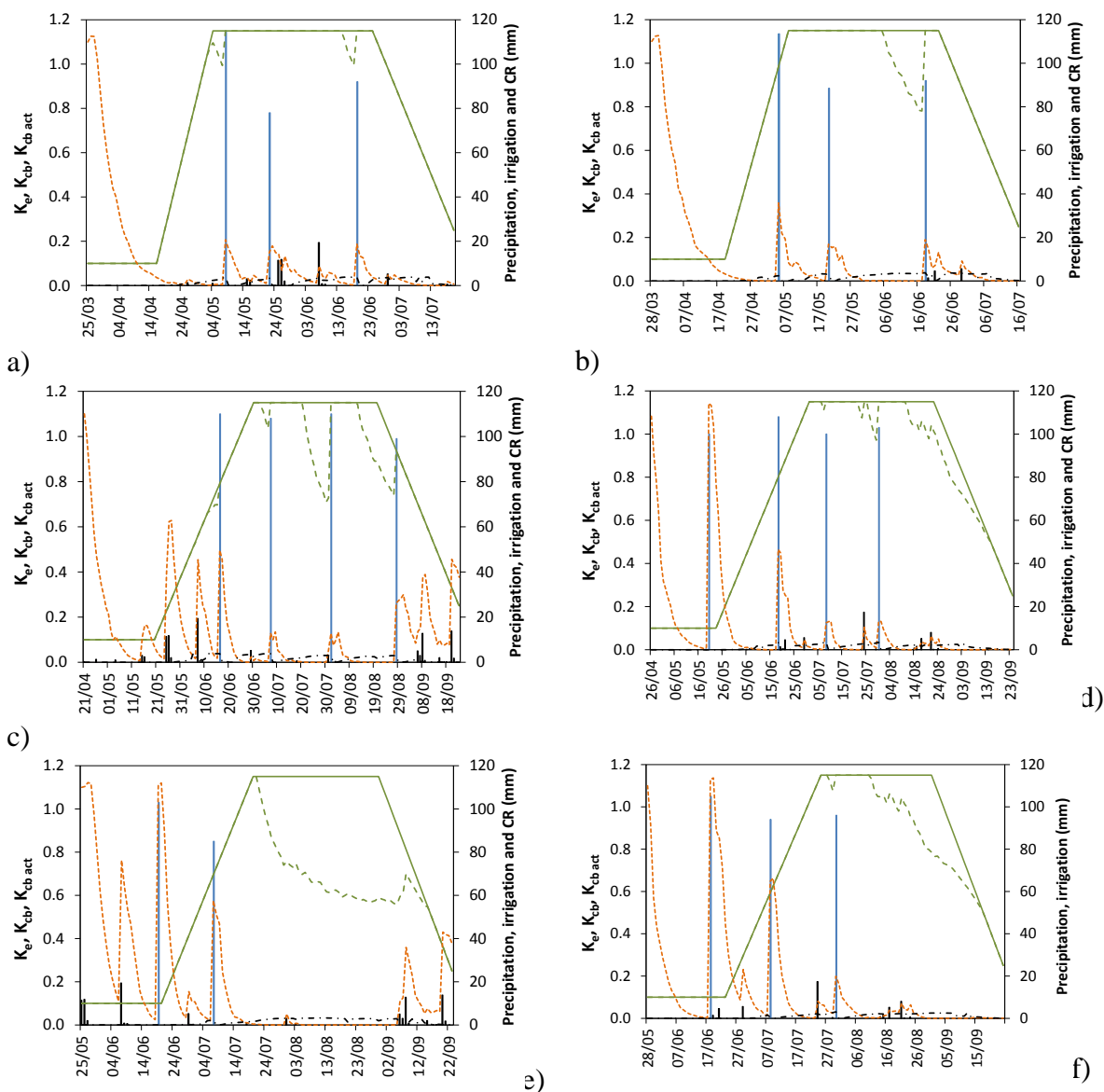


Fig. 5.8. Curvas dos coeficientes culturais de base K_{cb} (—) e $K_{cb act}$ (---), e coeficiente de evaporação K_e (---) para as monoculturas do trigo em 2010 (a) e 2011 (b), do milho em 2010 (c) e em 2011 (d), e do girassol em 2010 (e) e em 2012 (f). Também são apresentadas as curvas de precipitação (I), rega (I) e ascensão capilar (— · —).

Os termos do balanço hídrico do solo para as monoculturas do trigo, milho e girassol para as estações de crescimento de 2010 a 2012 são apresentados na Tabela 5.8. Os resultados mostram que a contribuição das águas subterrâneas para a evapotranspiração, i.e., a ascensão capilar (CR) é bastante importante para as três culturas, representando 21-33% da $ET_{c act}$. No caso do trigo foi de 21-30%, para o milho foi de 23-26% e para o girassol de 21-33%. Estes valores são semelhantes aos obtidos por Xu et al. (2013) para o perímetro de rega de Huinong. CR variou ao longo dos três anos de estudo em função das datas das regas, sendo geralmente maior quando os défices hídricos foram mais acentuados; no entanto a rega não foi

programada por forma a maximizar a CR, mas sim cumprindo as decisões de distribuição da água para o canal de rega afectou à área experimental. A percolação profunda (DP) foi baixa (Tabela 5.8), variando de 0 a 14% da soma da precipitação com a rega ($P + I$), o que indica que as dotações de rega não excederam em geral os défices de água do solo. O valor de DP foi maior para o girassol porque as regas foram aplicadas no início da estação de crescimento (Fig. 5.8e, f), antes do período de maior consumo da cultura. Os resultados de DP são comparáveis, embora inferiores, aos relatados por Xu et al. (2013) ou aos observados num estudo de avaliação da rega na mesma área de Dengkou (Miao et al., 2015).

A evaporação do solo foi geralmente baixa, não superior a 14% da $ET_{c\ act}$ no caso dos cereais, mas mais elevada para o girassol, com E_s variando 20-26% da $ET_{c\ act}$ (Tabela 5.8). Estes valores mais elevados de E_s relacionam-se com o facto das regas para o girassol terem sido aplicadas na fase inicial do crescimento da cultura, quando a f_c era ainda baixa, ou seja, quando a radiação solar disponível à superfície do solo para evaporação era elevada. Os resultados identificam claramente a necessidade de um estudo focado na programação da rega para a cultura do girassol em Hetao, que possa levar à minimização de DP e E_s , ao mesmo tempo que potencie a CR, tendo em conta a necessidade de evitar a acama das plantas. Os resultados da E_s para o trigo de primavera e para o milho (Tabela 5.8) são comparáveis aos reportados por alguns autores em climas secos e áridos, como por exemplo, Hunsaker et al. (2005), que obteve um valor para E_s de 5-7% da $ET_{c\ act}$ para o trigo regado por gotejamento subsuperficial no Arizona, e Burt et al. (2001) que estimou $E_s \approx 11\%$ da $ET_{c\ act}$ em áreas agrícolas de regadio na Califórnia. Estudos relativos ao milho e ao trigo de inverno na Planície do Norte da China referem valores muito mais elevados de E_s devido à maior frequência dos humedecimentos do solo, particularmente para o milho, como sejam os de Yu et al. (2009), Chen et al. (2010) e Zhao et al. (2013). Os resultados para o milho não são muito diferentes dos obtidos por Wu et al. (2015), que relataram uma razão $E_s/ET_{c\ act}$ entre 17 e 23% para milho de sequeiro ‘alimentado’ por uma toalha freática superficial na Região Autónoma da Mongólia Interior. Os resultados para o girassol, com E_s representando 20-26% da $ET_{c\ act}$ (Tabela 5.8), são comparáveis aos relatados por Jovanovic et al. (2000) e por López-Urrea et al. (2014), em que a E_s variou entre 20% e 30% da $ET_{c\ act}$.

Os resultados na Tabela 5.8 permitem também avaliar os efeitos do stresse hídrico na T_c , através da razão $T_{c\ act}/T_{c\ pot}$. Estes quocientes são bastante altos para o trigo e para o milho, o que já era expectável pela análise das curvas do K_{cb} na Fig. 5.8, que revelam apenas um stresse hídrico ligeiro. Diferentemente, os quocientes $T_{c\ act}/T_{c\ pot}$ são menores para o girassol,

particularmente em 2010, em consonância com os resultados da Fig. 5.8, que mostram a ocorrência de um elevado stresse hídrico no período médio e na fase final da estação de crescimento.

Tabela 5.8. Termos do balanço hídrico relativos às monoculturas do trigo, milho e girassol

Termos do balanço hídrico	unidades	2010			2011			2012		
		Trigo	Milho	Girassol	Trigo	Milho	Girassol	Trigo	Milho	Girassol
Entradas										
P	mm	60	103	95	12	47	46	103	194	168
I	mm	285	427	188	294	411	295	288	325	178
CR	mm	173	196	168	168	180	124	119	160	109
	% ET _{c act}	28	26	33	30	25	23	21	23	21
ΔASW	mm	111	27	105	114	106	113	77	23	88
Saídas										
DP	mm	0	0	41	31	14	38	8	0	19
	% (P+I)	0	0	14	10	3	11	2	0	5
ET _{c act}	mm	629	753	515	557	730	540	579	702	524
E _s	mm	62	107	131	58	91	106	70	101	136
	% ET _{c act}	10	14	25	10	12	20	12	14	26
T _{c act}	mm	568	646	383	499	639	435	509	600	388
	% T _c	99	93	76	96	97	93	99	99	94

P – precipitação, I –rega, ΔASW – variação da água disponível no solo, GWC – contribuição da toalha freática, DP – percolação profunda, $ET_{c \text{ act}}$ – evapotranspiração atual da cultura, E_s – evaporação do solo, $T_{c \text{ act}}$ – transpiração atual da cultura, T_c – transpiração máxima da cultura

5.3.4. Coeficientes culturais duais e uso da água para as consociações

As curvas de K_e , $K_{cb \text{ inter}}$ e $K_{cb \text{ inter act}}$ para as consociações T-M e T-G em 2010 e 2011 apresentam-se na Fig. 5.9, juntamente com a P, rega e CR. As curvas do $K_{cb \text{ inter}}$ e do $K_{cb \text{ inter act}}$ foram construídas como descrito no ponto 5.2.1. As curvas do $K_{cb \text{ inter}}$ diferem de um ano para o outro devido a diferenças nas datas dos estádios de desenvolvimento das culturas e nas datas de sementeira da cultura subordinada relativamente às da cultura dominante. Para a consociação T-G, a sementeira do girassol no segundo ano foi retardada relativamente ao primeiro, o que produziu uma diminuição mais acentuada da curva do $K_{cb \text{ inter}}$ durante a ‘meia estação’ da consociação.

Nas consociações T-M e T-G, o coeficiente de evaporação do solo K_e apresentou um comportamento distinto relativamente ao regime de monocultura, já que a rega humedeceu toda a superfície do solo no canteiro, produzindo assim uma elevada evaporação nas faixas ainda/já não cultivadas e expostas à radiação solar. Assim, a dimensão dos picos de K_e apresenta uma variação temporal diferente daquela observada ao longo das estações de crescimento das monoculturas (Fig. 5.8). O comportamento da CR é similar ao simulado para

as monoculturas, uma vez que a CR ocorre principalmente em resposta à extracção radicular da água do solo pelas culturas, seja em consociação ou em monocultura.

Relativamente à consociação T-M, pode notar-se que a primeira, a terceira e a quinta rega de 2010 foram aplicadas com um desfasamento relativamente às necessidades da cultura, resultando assim que a curva do $K_{cb \text{ inter act}}$ se situasse abaixo da curva do $K_{cb \text{ inter}}$ potencial durante alguns dias antes das referidas rega (Fig. 5.9a). Isto indica a ocorrência de um stresse hídrico moderado durante o período médio (*mid-season*) que pode ter afectado as produções do trigo e do milho, uma vez que decorreu durante a o período médio de ambas as culturas, que inclui a floração e o desenvolvimento da produção. Contrariamente, em 2011, foi apenas detectado um stresse hídrico ligeiro.

Relativamente à consociação T-G (Fig. 5.9c, d), pode notar-se que o trigo sofreu apenas um stresse hídrico ligeiro em 2010, devido a uma aplicação tardia da primeira rega, e que o girassol sofreu de stresse hídrico desde o início do período médio até perto da colheita em ambos os anos de 2010 e 2011, devido à necessidade de evitar a podridão-de-esclerotínia ou mofo branco (*Sclerotinia sclerotiorum*) e a acama das plantas. Comparativamente ao girassol monocultivado das Figs. 5.8e e 5.8f, é aparente nas Figs. 5.9c e 5.9d que girassol quando cultivado em consociação com o trigo foi ligeiramente menos afectado pelo stresse hídrico.

Os resultados na Fig. 5.9, de modo semelhante aos das monoculturas da Fig. 5.8, mostram que o calendário de rega aplicado não foi adequado para maximizar a produção, com as regas muitas vezes atrasadas em relação às necessidades das culturas durante o período médio, numa altura em que o stresse hídrico tem mais consequências sobre as produções das culturas. Pode então concluir-se que é necessário apelar junto dos gestores do canal de rega de Dendkou para a introdução de melhorias quanto à programação da rega, atendendo tanto à necessidade de adopção de técnicas de poupança de água como a um melhor uso das águas subterrâneas, como já analisado por Xu et al., 2010, 2011, 2013.

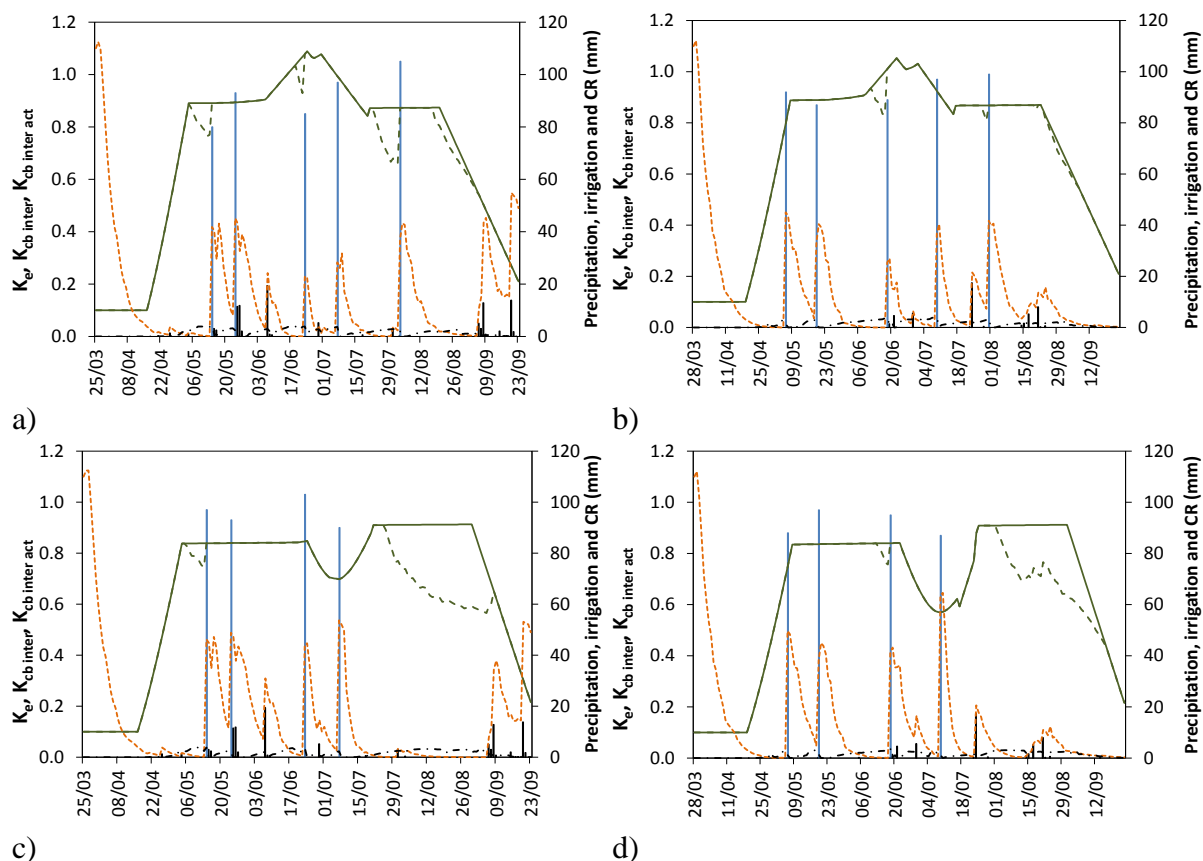


Fig. 5.9. Curvas dos coeficientes basais das culturas $K_{cb \text{ inter}}$ (—) e $K_{cb \text{ inter act}}$ (---), e do coeficiente de evaporação K_e (---) do sistema de alternância trigo-milho em 2010 (a) e 2011 (b), e do sistema trigo-girassol em 2010 (c) e em 2011 (d). Também são apresentadas as curvas de precipitação (l), rega (l) e ascensão capilar (· · ·)

As componentes do balanço hídrico do solo para as consociações T-M e T-G para as estações de crescimento de 2010 e 2011 são apresentadas na Tabela 5.9. Tal como para as monoculturas, os resultados mostram que a CR desempenhou um papel importante para a ET_c das consociações T-M e T-G, representando 27-29% do valor da $ET_{c \text{ act}}$ no caso T-M, e 30-31% da $ET_{c \text{ act}}$ no caso T-G. Estes valores são próximos dos obtidos como a média ponderada da CR das duas culturas consociadas quando cultivadas isoladamente (de acordo com a Eq. 5.1), que foram 30-31% da $ET_{c \text{ act}}$ para o trigo e milho, e 31-35% da $ET_{c \text{ act}}$ para o trigo e girassol. No entanto, a CR total para ambas as consociações, 265 e 236 mm para T-M e 249 e 243 mm para T-G, são maiores do que a média ponderada dos respectivos valores das monoculturas: 183, 173, 171 e 148 mm. Esta maior CR está provavelmente relacionada com a maior duração da estação de crescimento e consequentemente com a maior duração da extracção radicular da água do solo comparativamente às monoculturas. É também possível que se deva a um melhor desenvolvimento das raízes e às interações entre os sistemas radiculares das duas culturas consociadas, que resultam numa melhoria da extracção da água

do solo e da toalha freática superficial, tal como constataado por Brisson et al. (2004). No entanto, esta suposição não pôde neste estudo ser provada a partir de observações da densidade e profundidade das raízes, embora vários autores também referiram melhorias no desenvolvimento radicular e no aumento da extracção de água (Li et al., 2006; Yang et al., 2010b; Brooker et al., 2015.). Quanto à percolação profunda (DP) foi muito baixa em ambos os anos (0 a 5% de P + I), o que indica que as dotações de rega foram, em geral, adequadas se considerado apenas este factor.

Os valores da $ET_{c\ act}$ nas consociações T-M e T-G (Tabela 5.9 e Fig. 5.10) foram substancialmente mais elevados do que a média ponderada da $ET_{c\ act}$ para as respectivas monoculturas. $ET_{c\ act}$ foi de 871-910 mm para a consociação T-M e 781-837 mm para T-G, enquanto $ET_{c\ act}$ obtido pela média ponderada dos valores em monocultura do trigo e do milho, e do trigo e girassol foi, respectivamente, 629-681 mm e 549-577 mm (Fig. 5.10). Vários autores relatam grandes aumentos da ET das culturas quando consociadas, por exemplo, Chai et al. (2011) e Yang et al. (2011). Este aumento do valor de $ET_{c\ act}$ para as consociações deve-se principalmente ao facto de $K_{cb\ inter}$ levar em consideração, através do coeficiente de densidade K_d (Fig. 5.3), a maior intercepção da radiação solar, rugosidade aerodinâmica dos cobertos, e advecção localizada de energia entre as faixas cultivadas com as duas culturas (ver Secção 2.3). Assim, $K_{cb\ inter}$ torna-se maior do que a média ponderada dos K_{cb} das duas culturas da consociação quando cultivadas separadamente, resultando numa maior transpiração potencial das consociações (T_c) relativamente à média ponderada da T_c das monoculturas.

O maior valor de $ET_{c\ act}$ para as consociações também se relaciona com uma maior dotação total de rega nas consociações, 460-464 mm para T-M e 367-383 mm para T-G, valores substancialmente maiores do que a média ponderada da rega aplicada ao trigo e ao milho em monocultura (343-344 mm) e ao trigo e ao girassol em monocultura (241-294 mm). Esta maior quantidade de rega diminuiu a intensidade do stresse hídrico aplicado às culturas consociadas relativamente àquele verificado em condições de monocultura. Além disso, como analisado anteriormente, CR foi também maior, enquanto uma maior variação da água disponível no solo (ΔASW) representou um maior uso da água armazenada no solo pelas consociações T-M e T-G, como pode ser observado pela comparação das Tabelas 5.8 e 5.9. Assim, verificou-se um menor afastamento entre T_c e $T_{c\ act}$ e um aumento de E_s , resultando assim num valor de $ET_{c\ act}$ mais elevado do que nos sistemas de monocultura.

Tabela 5.9. Componentes simulados do balanço hídrico dos sistemas de alternância trigo-milho (W-M) e trigo-girassol (W-S)

Termos do balanço hídrico	Units	2010		2011	
		W-M	W-S	W-M	W-S
Entradas					
P	mm	103	103	47	47
I	mm	460	383	464	367
ΔASW	mm	112	121	125	128
GWC	mm	265	249	236	243
	% ET _c				
	act	29	30	27	31
Saídas					
DP	mm	30	18	1.1	3.5
	%				
	(P+I)	5	4	0	1
ET _{c act}	mm	910	837	871	781
E _s	mm	135	144	122	128
	% ET _c				
	act	15	17	14	16
T _{c act}	mm	775	693	749	653
	% T _c	97	92	99	94

P – precipitação, I – rega, Δ SWC – variação da água disponível no solo, GWC – contribuição da toalha freática, DP – percolação profunda, $ET_{c \text{ act}}$ – evapotranspiração atual da cultura, E_s – evaporação do solo, $T_{c \text{ act}}$ – transpiração atual da cultura, T_c – transpiração máxima da cultura

Os valores mais elevados de $T_{c \text{ act}}$ em ambas as consociações relativamente à média ponderada da $T_{c \text{ act}}$ das culturas consociadas quando cultivadas separadamente (Fig. 5.10), estão provavelmente associados à sobreprodução observada tanto para os sistemas T-M como T-G (Fig. 5.11). Em ambas as Figs. 5.10 e 5.11, a comparação entre os resultados obtidos para as consociações e os obtidos pela média ponderada para as duas culturas consociadas seguiu o procedimento descrito relativamente à Eq. 5.10. Assim, as produções apresentadas na Fig. 5.11 são expressas por unidade de superfície de solo (kg ha^{-1}). Produções mais elevadas obtidas em consociações T-M são reportadas por vários autores, apontando várias causas para a sobreprodução observada, como sejam, Zhang e Li (2003), Yang et al. (2011), Qin et al. (2013) e Gao et al. (2014). No presente estudo, as vantagens na produção obtidas nas consociações relativamente às monoculturas foram em grande parte devidas ao facto de que a T_c e $T_{c \text{ act}}$ foram maiores do que nas monoculturas correspondentes e da ocorrência de stresse hídrico ter sido mais ténue, como discutido anteriormente. Este facto foi também discutido quando na análise da Fig. 5.9 e foi confirmado por uma maior proporção da $T_{c \text{ act}}$ em relação à T_c para as consociações (Tabela 5.9). No entanto, uma vez que tanto a produção como o consumo de água pelas consociações aumentaram, a produtividade da água (WP , kg m^{-3}) manteve-se quase inalterada (Fig. 5.11c).

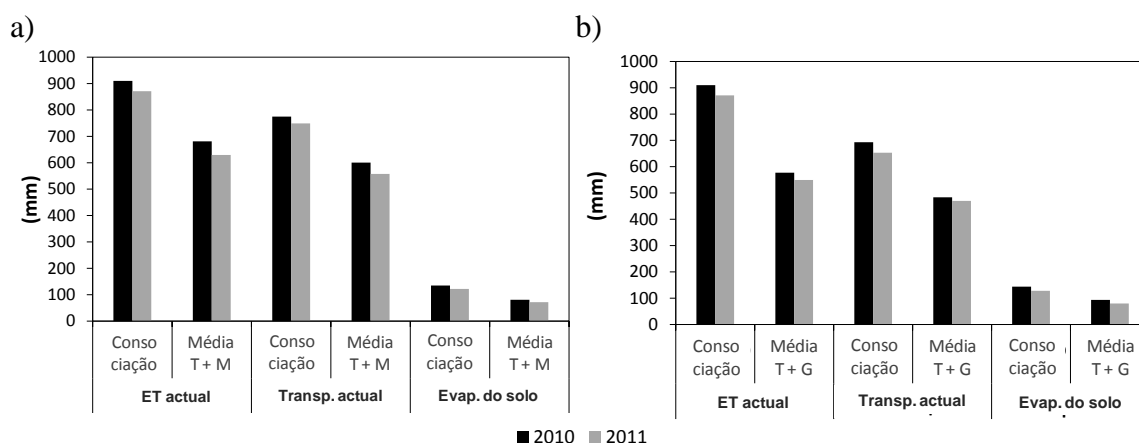


Fig. 5.10. Comparação dos resultados obtidos nas consociações com as médias ponderadas das duas culturas constituintes relativamente à $ET_{c\ act}$, $T_{c\ act}$, e E_s para a estações de crescimento de 2010 e 2011: a) consociação trigo-milho, e b) alternância trigo-girassol

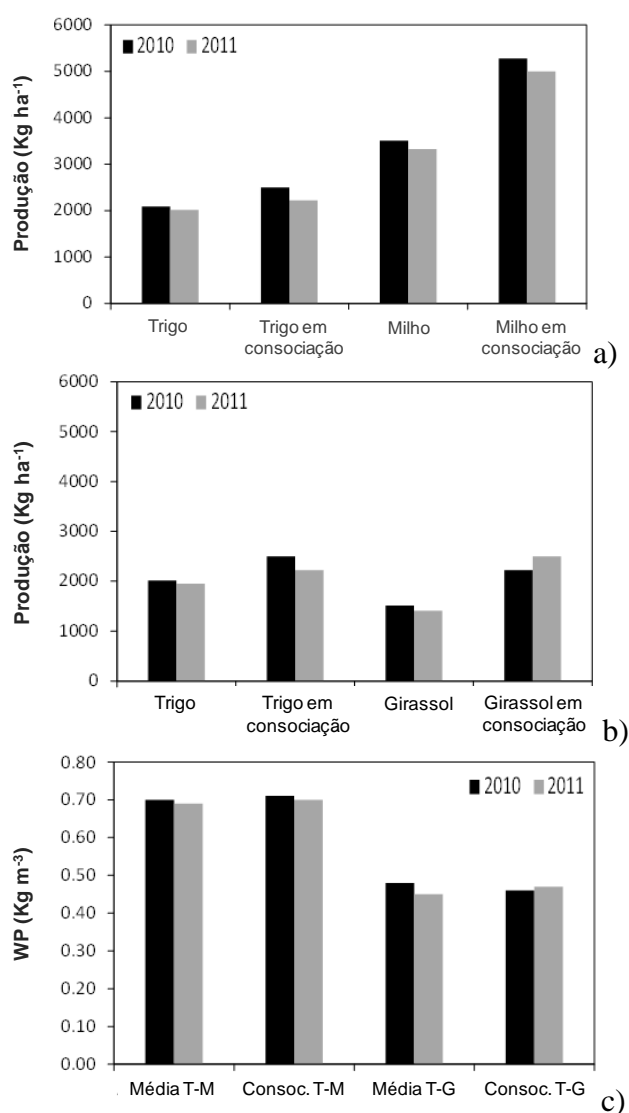


Fig. 5.11. Comparação das produções obtidas em a) trigo e milho em monocultura e em consociação, e b) trigo e girassol em monocultura e em consociação; c) comparação da

produtividade da água (WP) das monoculturas com o sistema de consociação.

O facto de as consociações consumirem mais água do que as monoculturas mas serem obtidas produções mais elevadas pode revelar-se contraditório ao objetivo geral de economizar água aquando da modernização dos sistemas de rega de Hetao. No entanto, este objectivo geral requer mudanças nas práticas de rega que levem à minimização do consumo não-benéfico da água de rega, como discutido por Pereira et al. (2012), que parece ser viável ao analisar os resultados de vários autores, por exemplo, Xu et al. (2010) e Miao et al. (2015). Minimizar o uso não-benéfico de água, juntamente com a melhoria das práticas agronómicas, deve ser um dos objectivos principais de futuros estudos e da extensão aos agricultores, já que a WP manteve-se praticamente inalterada.

5.4. Conclusões

Foi desenvolvida e implementada no modelo SIMDualKc uma nova abordagem para o cálculo diário dos coeficientes culturais de base (K_{cb}) para consociações de culturas ($K_{cb\ inter}$), especialmente indicada para consociações por faixas alternadas e para quando o desenvolvimento das duas culturas é desfasado no tempo. Os valores diários de $K_{cb\ inter}$ são calculados a partir dos valores diários do K_{cb} das duas culturas consociadas quando cultivadas isoladamente e dos coeficientes de densidade (K_d) destas quando consociadas, que dependem por sua vez das fracções (f_r) da superfície do solo cultivadas com cada uma das culturas da consociação e das suas alturas (h). Também se reformulou o cálculo da fracção de depleção da água do solo em conforto hídrico (p) para as consociações (p_{inter}), calculando-o como a média ponderada dos valores de p das duas culturas consociadas, cujos pesos são os valores do K_{cb} das duas culturas quando cultivadas isoladamente, a h das culturas e a f_r de cada uma das faixas cultivadas. O modelo com esta nova abordagem foi aplicado para as consociações trigo de primavera-milho (T-M), e trigo de primavera- girassol (T-G). A aplicação desta nova abordagem para o cálculo do $K_{cb\ inter}$ e p_{inter} juntamente com a metodologia dos K_c duais para o cálculo separado da T_c e da E_s , bem como as equações paramétricas de Liu et al. (2006) para cálculo da CR e da DP, todas implementadas no SIMDualKc, permitiram uma boa percepção das diferenças ao nível do uso da água em consociações de culturas e em sistemas de monocultura. Além disso, os indicadores da qualidade do ajustamento das previsões do modelo mostraram um bom desempenho do modelo. A análise dos termos do balanço hídrico relativamente às monoculturas e às consociações permitiu identificar a grande importância da CR para a ET_c na área de estudo Dengkou, que representou 21-33% do valor de $ET_{c\ act}$ nas

monoculturas e 27-31% do valor de $ET_{c\ act}$ em consociações. Qualquer melhoramento futuro da programação da rega deve, portanto, ter em conta a importância desta componente no fornecimento de água às culturas. Os resultados indicaram que a evaporação foi em geral baixa: $E_s/ET_{c\ act} \leq 14\%$ para os cereais em monocultura, mas mais elevada para o girassol devido à concentração da rega nas fases iniciais do desenvolvimento da cultura, quando f_c é ainda baixa. A razão $E_s/ET_{c\ act}$ variou 14-17% no caso das consociações T-M e T-G. Assim, constata-se que já existem condições que favorecem um uso eficiente de água.

Comparando o uso da água pelas consociações com o das monoculturas correspondentes, concluiu-se que a $ET_{c\ act}$ foi muito maior, em cerca de 250 mm, relativamente a estas últimas. Isto deveu-se ao facto de que $K_{cb\ inter}$ foi consideravelmente superior à média ponderada dos K_{cb} das duas culturas consociadas quando cultivadas isoladamente, porque $K_{cb\ inter}$ tem em conta a melhor interceptação da luz solar, a maior rugosidade aerodinâmica das consociações e a micro-advecção de energia entre as faixas de cultivo, especialmente importante quando uma das faixas ainda/já não se encontra cultivada. Este maior valor de $ET_{c\ act}$ deveu-se também à aplicação de maiores quantidades de rega, maior CR e melhor uso da água armazenada no solo. A transpiração actual das consociações foi também maior do que a das monoculturas correspondentes, em 22-26% para W-M e 28-30% para W-S, o que revelou ter existido menos stress hídrico. Consequentemente, a produção de cada cultura constituinte das consociações foi maior em relação ao regime de monocultura em 9-19% para o trigo, 33% para o milho e 32-44% para o girassol. No entanto, a produtividade da água manteve-se a mesma, porque a produção e o uso total de água aumentaram na mesma proporção.

Os resultados obtidos são indicativos das vantagens que podem ser alcançadas através da adopção dos sistemas de consociação de culturas, mas também identificam uma grande necessidade em melhorar o uso da água através do ajustamento dos calendários de rega às exigências das culturas e através da redução dos usos não-benéficos da água de rega, ou seja, através do melhoramento da gestão e das tecnologias de rega de superfície. A investigação deverá também concentrar-se nos factores económicos que influenciam a aplicação de abordagens inovadoras para o uso e poupança de água, controlo da salinidade e melhoria da calendarização da rega e da distribuição de água às parcelas.

Capítulo 6

Avaliação da transpiração, da evaporação do solo e do uso da água em sorgo sacarino e milho sob condições salinas

6.1. Introdução

A salinização do solo é uma ameaça crescente à produção agrícola em regiões com escassez de água, onde inclusivamente as águas de rega salinas são encaradas como um importante recurso. O uso sustentável destas águas exige no entanto um conhecimento preciso dos processos envolvidos, assumindo neste contexto a modelação, pela capacidade de considerar os diversos factores intervenientes, um papel decisivo na gestão deste tipo de águas para a rega. O objectivo deste estudo foi desenvolver e testar uma abordagem empírica, implementada no modelo SIMDualKc, para a consideração dos efeitos de condições transitórias de stresse salino na transpiração das culturas do milho e do sorgo sacarino calculada pelo SIMDualKc. Esta abordagem levou em consideração o estado de salinidade do solo, expresso em termos dos valores da condutividade eléctrica do extracto de saturação do solo (EC_e) no início e no fim de cada estação de crescimento, a tolerância das culturas à salinidade do solo, dada em função de um limiar superior da EC_e acima do qual o crescimento e a produção das culturas começam a ser afectados ($EC_{e\text{ threshold}}$) e da percentagem de redução da produção por unidade de aumento de EC_e (b), e a disponibilidade de água no solo em condições salinas, tanto em termos do total disponível (TAW_{salt}) como do volume ‘facilmente utilizável’ (RAW_{salt}).

Os valores do teor de água do solo (SWC) simulados pelo SIMDualKc em condições não salinas foram comparados com os valores medidos do SWC nas mesmas condições durante três estações de crescimento consecutivas do milho (2004 a 2006) e duas do sorgo sacarino (2008 e 2009), com o objectivo de calibrar os parâmetros do modelo relativos à transpiração da cultura (K_{cb} e p), à evaporação do solo (Z_e , TEW e REW) e à percolação profunda (a_D e b_D) (ver Capítulo 3). Depois, utilizando estes parâmetros calibrados para condições não salinas, correu-se o modelo para diferentes condições transitórias de salinidade e calibraram-se os valores de $EC_{e\text{ threshold}}$ e b através da comparação entre os valores simulados e observados de SWC para aquelas condições, obtendo-se assim os valores de K_{cb} ajustados ao stresse salino ($K_{cb\text{ act}}$) e consequentemente a transpiração actual ($T_{c\text{ act}}$) nestas mesmas condições.

Dada a ausência de valores medidos da $T_{c\text{ act}}$ em condições de stresse salino, os valores da T_c potencial ($K_{cb} ET_o$) e da E_s ($K_e ET_o$) calibrados como descrito acima foram utilizados no

modelo HYDRUS-1D (descrito na Secção 6.2.3) como condições superiores de fronteira, por forma a simular a evapotranspiração actual ($ET_{c\ act}$) e a $T_{c\ act}$ das duas culturas, servindo estas de referência aos respectivos valores calculados com o SIMDualKc. Assim, uma vez validado o modelo SIMDualKc com esta nova abordagem, este pode constituir uma ferramenta alternativa simples para a gestão da rega com águas salinas em regiões com escassez de água.

6.2. Materiais e métodos

6.2.1. Descrição do ensaio experimental

O ensaio de campo teve como objectivo avaliar os impactos nas culturas da utilização de águas de rega salinas sintéticas misturadas com água doce. O milho (*Zea mays* L.) foi cultivado de 2004 a 2006 e o sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) em 2008 e 2009. Os dados experimentais utilizados neste estudo foram já previamente apresentados por Ramos et al. (2009, 2011) para o milho, e por Ramos et al. (2012a,b) para o sorgo sacarino. Por este motivo, apenas a informação relevante para o presente estudo é aqui apresentada.

Os ensaios de campo foram realizados na estação experimental de Alvalade do Sado (37°56'48"N, 8°23'40"W), localizada no sudoeste do Alentejo, sul de Portugal. O clima na região é sub-húmido seco, com verões quentes e secos e invernos suaves. Os valores das temperaturas máximas (T_{max}) e mínimas (T_{min}), da evapotranspiração de referência (ET_o) (assumindo o relva como cultura de referência) e da precipitação (P) durante o período dos ensaios são apresentados na Fig. 6.1. A ET_o foi calculada pelo método FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) utilizando dados diários de temperatura e humidade relativa do ar medidos a 2 metros de altura (Higrotermómetro transmissor compacto, modelo 1.1005.54.000, Thies Clima, Alemanha), de velocidade do vento a 2 m de altura (Anemómetro, modelo A100L2, Vector Instruments, Reino Unido), e de radiação solar (Piranómetro, modelo EP08, McVan Instruments, Austrália). Os dados foram medidos numa estação meteorológica localizada 4 km a oeste da área experimental, na mesma planície.

O solo classifica-se como um Fluvissoilo êutrico (IUSS Working Group WRB, 2014), cujas características foram analisadas detalhadamente por Ramos et al. (2011, 2012b), sendo aqui apresentadas na Tabela 6.1.

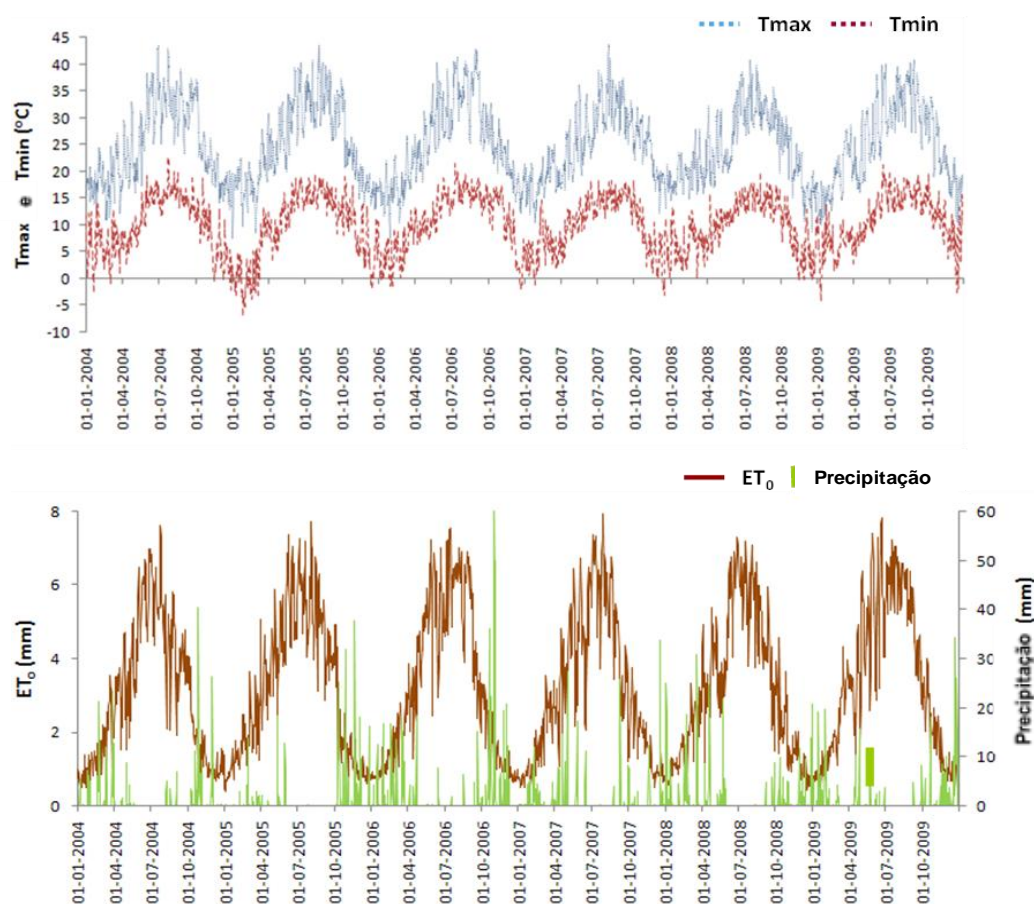


Fig. 6.1. Temperaturas mínimas (T_{\min}) e máximas (T_{\max}) diárias, evapotranspiração de referência (ET_0) e precipitação em Alvalade do Sado entre 2004 e 2009.

Tabela 6.1. Principais características físicas e químicas do solo da estação experimental.

Profundidade (cm)	0-30	30-75
Areia grossa, 200-200 μm (%)	8.3	6.5
Areia fina, 200-20 μm (%)	52.4	46.2
Limo, 20-2 μm (%)	26.3	29.3
Argila, <2 μm (%)	13.0	18.0
Textura	Franca	Franco-limosa
Densidade aparente (g cm^{-3})	1.49	1.51
pH (H_2O)	7.27	7.23
Matéria orgânica (%)	2.30	2.26
θ_{FC} ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0.317	0.286
θ_{WP} ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0.103	0.142
Parâmetros de van Genuchten-Mualem:		
θ_r ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0.050	0.108
θ_s ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0.380	0.380
α (cm^{-1})	0.027	0.115
η (-)	1.21	1.19
λ (-)	-4.41	-5.37
K_{sat} (cm d^{-1})	16.6	84.4
Parâmetros do transporte de solutos:		
ε_L (cm)	25.8	25.8

θ_{FC} , teor de água do solo à capacidade de campo; θ_{WP} , teor de água do solo no ponto de emurchecimento; θ_r , teor de água residual; θ_s , teor de água à saturação; α e η , parâmetros de forma empíricos; λ , parâmetro de tortuosidade/conectividade dos poros; K_{sat} , condutividade hidráulica saturada; ε_L , dispersividade longitudinal.

O sistema de rega utilizado foi o de gota-a-gota. Este sistema consistiu em três ramais laterais porta gotejadores unidos de maneira a formar um ramal lateral de tripla fonte de emissão colocado ao longo de cada linha de plantas (Fig. 6.2). O primeiro lateral foi ligado ao reservatório com a solução salina (NaCl), enquanto que o segundo foi ligado ao reservatório com o azoto. O terceiro lateral providenciou água doce e foi utilizado para obter uma taxa de aplicação constante em cada ‘ponto de gotejamento’ ao longo do lateral triplo ($18 \text{ l h}^{-1} \text{ m}^{-1}$, i.e., 24 mm h^{-1}). Foram então estabelecidos gradientes de concentração de sal (Na^+) e azoto (N) por meio da colocação de diferentes emissores em cada ponto de gotejamento ao longo dos laterais correspondentes e fazendo variar as taxas de aplicação por forma a obter várias misturas entre os três laterais. Este esquema de rega possibilitou que se estabelecessem 12 parcelas experimentais com águas de diferentes qualidades, enquanto que a dotação de rega em cada evento e a quantidade total de água aplicada na estação de crescimento, bem como a qualidade da água de rega antes da mistura, se mantiveram idênticas para todas as parcelas. O valor de EC das águas salinas sintéticas (EC_{iw}) variou entre 5.6 e 10.6 dS m^{-1} , enquanto que o valor da EC_{iw} da água doce variou 0.8 - 1.2 dS m^{-1} (Tabela 6.2). Para este estudo apenas as parcelas com máximo (HS) e nulo (NS) stresse salino foram consideradas (Fig.6.2).

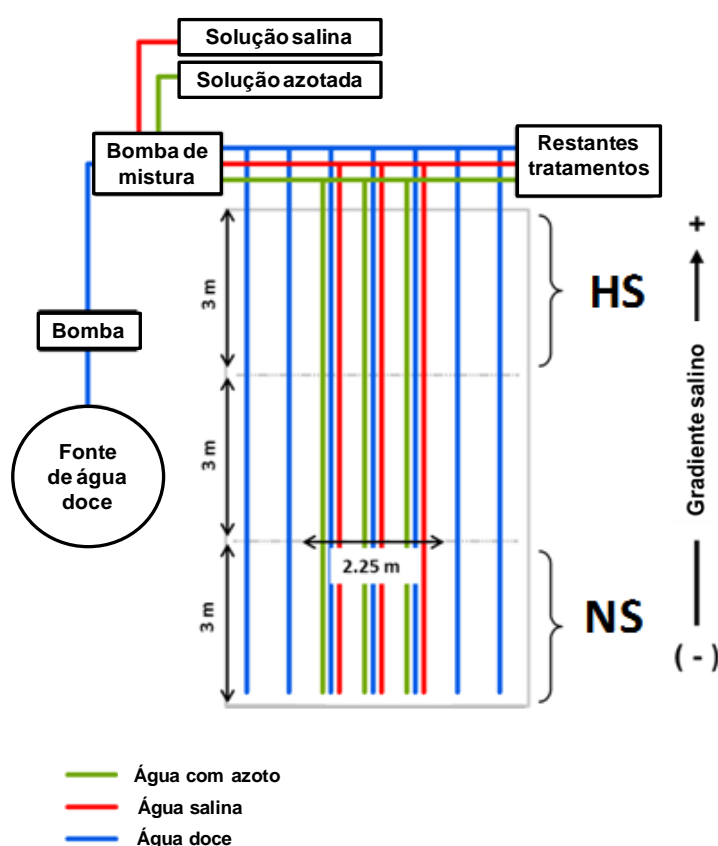


Fig. 6.2. Esquema da fonte de emissores triplos (adaptado de Ramos et al., 2009). O gradiente de concentração salina aumenta da parcela NS para a parcela HS.

Tabela 6.2. Eventos de rega, qualidade da água de rega, teores iniciais de água do solo, condutividade elétrica do extrato de saturação, e desenvolvimento da cultura nas parcelas salinas (HS) e não salinas (NS) durante os períodos experimentais 2004-2006 e 2008-2009.

	2004		2005		2006		2008		2009	
	HS	NS	HS	NS	HS	NS	HS	NS	HS	NS
Eventos de rega:										
Nº de eventos	49	49	37	37	44	44	33	33	33	33
dotação média (mm)	20	20	25	25	23	23	16	16	17	17
Total de água doce (mm)	582	865	36	748	15	850	156	432	12	486
Total de água salina (mm)	283	-	712	-	835	-	276	-	474	-
Total de água com N (mm)	132	132	116	116	178	178	90	90	60	60
Total de rega (mm)	997	997	864	864	1028	1028	522	522	546	546
f_w (-)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.4	0.4	0.4	0.4
Qualidade das águas de rega:										
$EC_{\text{água doce}}$ (dS m ⁻¹)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	0.8	0.8	0.8	0.8
$EC_{\text{água salina}}$ (dS m ⁻¹)	5.6	-	5.6	-	10.6	-	6.7	-	7.3	-
$EC_{\text{água com N}}$ (dS m ⁻¹)	6.0	6.0	3.1	3.1	4.5	4.5	2.8	2.8	3.0	3.0
Propriedades do solo:										
θ_i (m ³ m ⁻³)	0.31	0.310	0.315	0.315	0.315	0.32	0.287	0.29	0.274	0.274
EC_e início estação de rega (dS m ⁻¹)	0.6 (0.1)	0.6 (0.1)	2.8 (1.1)	2.2 (0.5)	4.0 (3.3)	2.0 (0.8)	4.8 (2.1)	1.1 (0.1)	3.5 (1.5)	0.7 (0.2)
EC_e fim estação de rega (dS m ⁻¹)	3.3 (0.3)	2.0 (0.9)	5.5 (1.9)	2.3 (0.3)	6.5 (1.7)	2.1 (2.0)	5.3 (0.4)	1.4 (0.3)	5.3 (1.4)	2.2 (2.1)
Desenvolvimento da cultura:										
Prof. radicular máx. (m)	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.65	0.65	0.65	0.65
Altura máxima (m)	1.84	1.95	1.84	1.95	1.80	2.24	1.73	2.46	1.77	2.34
Máximo LAI (m ² m ⁻²)	4.5	5.7	3.7	5.7	3.6	5.4	4.0	4.3	4.5	4.6
Máxima f_c (-)	0.87	0.94	0.77	0.93	0.75	0.91	0.80	0.84	0.86	0.87

θ_i , teor inicial de água no solo; EC_e , condutividade elétrica do extrato de saturação do solo; LAI, índice de área foliar; f_w , fração da superfície do solo humedecida pela rega; f_c , fração de cobertura do solo. Os desvios-padrão de EC_e são dados entre parênteses.

Foram instaladas sondas TDR (Trase System, Soil Moisture Equipment Corp., Goleta, CA, USA) às profundidades de 20, 40 e 60 cm para medir o teor de água do solo duas vezes por semana, normalmente 24 h após a rega. Foram recolhidas amostras de solo às mesmas profundidades para medir o valor de EC_e no início e no fim de cada estação de crescimento, sendo depois determinado o valor médio de EC_e na camada 0-60 cm (Tabela 6.2). A profundidade radicular máxima foi determinada pela observação dos perfis do solo no fim de cada estação de crescimento (Ramos et al., 2011, 2012b) (Tabela 6.2). A altura das plantas e o índice de área foliar (LAI) foram monitorizados durante as diferentes fases do ciclo de desenvolvimento das duas culturas usando um método não destrutivo para evitar a remoção das plantas da área experimental. O comprimento (L) e a largura (W) das folhas foram medidos em três plantas escolhidas aleatoriamente em cada parcela experimental. Estas dimensões foram então convertidas no LAI usando um modelo previamente calibrado, dado pela seguinte equação (Ramos et al., 2012b):

$$LAI = 0.7586 \sum_{i=1}^n (L \times W) \quad (6.1)$$

onde LAI são os valores medidos por um medidor de área LI-COR (Modelo LI-3100C, LI-

COR Environmental and Biotechnology Research System, Lincoln, NE, USA) e n é o número de folhas verdes em cada planta alvo das medições. As datas dos estádios de desenvolvimento do milho e do sorgo sacarino apresentam-se na Tabela 6.3.

Tabela 6.3. Datas dos estádios de desenvolvimento do milho e do sorgo sacarino.

Datas do início das fases de desenvolvimento das culturas	Milho			Sorgo sacarino	
	2004	2005	2006	2008	2009
Sementeira	28-04	26-04	05-05	15-05	15-05
Começo do crescimento rápido	22-05	20-05	27-05	12-06	14-06
Começo do período médio	10-07	05-07	05-07	25-07	21-07
Começo da senescência	26-08	24-08	20-08	09-09	24-08
Fim do ciclo/colheita	06-10	22-09	18-10	30-09	29-09

6.2.2. O modelo SIMDualKc para a previsão das dinâmicas da água do solo, da transpiração e da evaporação do solo em condições salinas

A metodologia utilizada pelo SIMDualKc para o cálculo do balanço hídrico do solo, da evapotranspiração cultural potencial (ET_c), da transpiração potencial (T_c), da evaporação do solo (E_s) e da transpiração actual ($T_{c\ act}$), que é menor do que a T_c quando ocorrem stresses matriciais e/ou osmóticos (utilizando-se para o efeito o coeficiente de stress - K_s) é descrita detalhadamente no Capítulo 3, apresentando-se aqui na Fig. 6.3 um resumo das abordagens seguidas pelo modelo para os cálculos efectuados no presente capítulo.

O balanço hídrico do solo na zona radicular, tal como apresentado na Fig. 6.3 é expresso em termos da depleção da água do solo no final do dia ($D_{r,i}$), remetendo-se para o ponto 3.2.6 do Capítulo 3 a descrição dos termos do balanço e as abordagens seguidas para o seu cálculo. Como já referido no Capítulo 3, o SIMDualKc utiliza um coeficiente de evaporação (K_e) para descrever a evaporação da água a partir da camada superficial do solo (E_s) e um coeficiente cultural de base (K_{cb}) para descrever a transpiração das culturas (T_c) (Fig. 6.3), calculando assim separadamente a duas componentes do consumo total de água pelas culturas, i.e., a evapotranspiração cultural (ET_c). Tal como se pode observar na Fig. 6.3 o valor de K_e depende do termo ($K_{c\ max} - K_{cb}$), que impõe uma restrição ao K_e através da quantidade de energia disponível à superfície do solo em conjunção com a energia consumida pela transpiração, e do termo K_r (0-1), que reduz K_e quando a depleção de água na camada superficial do solo (D_e) ultrapassa a água facilmente evaporável (REW) (ponto 3.2.1.2, Capítulo 3). Apesar de, tal como descrito no ponto 3.2.2, os valores de K_{cb} ao longo do ciclo de desenvolvimento das culturas possam ser calculados a partir da fracção de cobertura do

solo pelas culturas (f_c) e pela altura destas (h) (tal como efectuado no Capítulo 5 para as culturas da pereira e do limoeiro), no presente estudo, e tal como usualmente efectuado para cobertos herbáceos homogéneos, a curva do K_{cb} foi obtida a partir da calibração de valores tabelados (padrão) do K_{cb} para os estádios inicial ($K_{cb\ ini}$) e médio ($K_{cb\ mid}$), e para o fim do ciclo de desenvolvimento ($K_{cb\ end}$) para as culturas aqui estudadas, depois de ajustados ao clima local (Fig. 6.3).

Equação do balanço hídrico do solo na zona radicular

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} + (Z_{r,i} - Z_{r,i-1}) \cdot (D_{r\ inf\ mm/m,i-1}) - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i$$

Cálculo da ET_c pela abordagem dos K_c duais

$$ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_o$$

Coefficiente de evaporação do solo (k_e) e Coeficiente cultural de base (k_{cb})

$$K_e = K_r (K_{c\ max} - K_{cb\ act}) \leq f_{ew} K_{c\ max}$$

$$K_r = \frac{TEW - D_{e,i-1}}{TEW - REW} \quad \text{se } D_{e,i-1} > REW$$

$\underbrace{K_{cb\ ini} \quad K_{cb\ mid} \quad K_{cb\ end}}_{\text{Calibração dos valores tabelados, ajustamento climático e construção da curva do } K_{cb}}$

Partição da ET_c entre transpiração (T_c) e evaporação do solo (E_s)

$$T_c = K_{cb} ET_o \quad E_s = K_e ET_o$$

Stresses matricial e osmótico: Coeficiente de stress (K_s) e T_c actual

$$T_{c\ act} = K_s K_{cb} ET_o$$

$$K_s = \underbrace{\left(\frac{TAW_{salt} - D_{r,i}}{TAW_{salt} - RAW_{salt}} \right)}_{\text{Componente matricial}} \underbrace{\left(1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_{e\ threshold}) \right)}_{\text{Componente osmótica}}$$

Correcção de TAW e RAW para condições de salinidade do solo

$$\theta_{WP\ salt} = \theta_{WP} + \frac{b}{100} \left(\frac{EC_e - EC_{e\ threshold}}{10} \right) (\theta_{FC} - \theta_{WP})$$

$$p_{salt} = p - b (EC_e - EC_{e\ threshold}) p$$

$$\left. \begin{array}{l} \theta_{WP\ salt} = \theta_{WP} + \frac{b}{100} \left(\frac{EC_e - EC_{e\ threshold}}{10} \right) (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \\ p_{salt} = p - b (EC_e - EC_{e\ threshold}) p \end{array} \right\} \rightarrow \begin{array}{l} RAW_{salt} = p_{salt} TAW \\ TAW_{salt} = (\theta_{FC} - \theta_{WP\ salt}) 10 Z_r \end{array}$$

Fig. 6.3. Equações utilizadas pelo SIMDualKc para cálculo do balanço hídrico do solo, evapotranspiração cultural potencial (ET_c), transpiração potencial (T_c), evaporação do solo (E_s) e transpiração actual ($T_{c\ act}$) pela consideração do coeficiente de stress K_s (matricial e osmótico) e pela redução de TAW (TAW_{salt}) e de RAW (RAW_{salt}).

Os valores da T_c , e consequentemente da ET_c , decrescem quando os valores dos potenciais matricial e osmótico da água do solo descem abaixo de determinados limites, fazendo com que a transpiração actual ($T_{c\ act}$) seja menor do que a T_c . Estes impactos são contabilizados

pela consideração de um coeficiente de stress (K_s), variando 0-1, que incorpora uma componente de stress matricial e outra de stress osmótico (Fig. 6.3). Em ambos os casos, o cálculo de K_s requer o balanço hídrico do solo diário na zona radicular por forma a determinar o teor de água do solo no fim de cada dia, expresso em termos da depleção da água na zona radicular (D_r). A componente osmótica do K_s leva em consideração o estado de salinidade do solo, expresso em termos dos valores da condutividade eléctrica do extracto de saturação do solo, EC_e ($dS\ m^{-1}$), a tolerância das culturas à salinidade do solo, $EC_{e\ threshold}$ ($dS\ m^{-1}$) e b ($\%/dS\ m^{-1}$), e o factor K_y (adimensional) da função de resposta água-produção (Stewart et al., 1977; Doorenbos e Kassam, 1979). Para além disso, na presença de stress salino, os valores de TAW e RAW são ajustados pela correcção do teor de água do solo no ponto de emurchecimento (θ_{WP}) e da fracção de depleção p , de acordo com as condições actuais de salinidade (EC_e) e com a tolerância específica das culturas àquelas condições ($EC_{e\ threshold}$ e b) (Fig. 6.3). Uma discussão mais aprofundada desta temática pode ser consultada no ponto 3.2.4 do Capítulo 3.

Os dados de entrada utilizados no presente estudo foram os seguintes:

- a) Dados climáticos: temperaturas diárias mínima e máxima ($^{\circ}C$), radiação solar ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), velocidade do vento ($m\ s^{-1}$), humidade relativa mínima (%), precipitação (P) ($mm\ d^{-1}$), e ET_o ($mm\ d^{-1}$);
- b) Dados do solo: número de camadas, profundidade das camadas (m), os valores respectivos de θ_{FC} ($m^3\ m^{-3}$) e θ_{WP} ($m^3\ m^{-3}$), bem como a distribuição da dimensão das partículas;
- c) Parâmetros da evaporação do solo: profundidade da camada evaporativa do solo (Z_e , m) o total de água evaporável (TEW, mm) e a água facilmente evaporável (REW, mm), estimados, respectivamente, através dos valores de θ_{FC} e θ_{WP} , e das características texturais da camada superficial evaporativa (Allen et al., 1998, 2005);
- d) Valores iniciais (observados) do teor da água do solo (SWC) na zona radicular e na camada evaporativa, expressos, respectivamente, em percentagem de TAW e TEW;
- e) Dados da salinidade: valores observados de EC_e no início e no fim das campanhas de rega, e os parâmetros $EC_{e\ threshold}$ ($dS\ m^{-1}$) e b ($\%/dS\ m^{-1}$) que caracterizam a tolerância/sensibilidade das culturas à salinidade.
- f) Dados das culturas: as datas definindo os estádios inicial, de crescimento rápido, período médio (mid-season), senescência e fim do ciclo/colheita; os valores do coeficiente cultural de base nos estádios no inicial e médio, e no fim do ciclo de crescimento ($K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$,

$K_{cb\ end}$); e para cada estágio de desenvolvimento os valores de: fração de depleção da água do solo em conforto hídrico (p), profundidade radicular (Z_r , m), altura das plantas (h , m), fração de cobertura do solo f_c (adimensional) e LAI ($m^2\ m^{-2}$);

g) Parâmetros da percolação profunda (a_D e b_D) relativos à equação paramétrica de Liu et al. (2006);

h) Dados da rega, referentes às datas e dotações de rega, e à fração da superfície do solo humedecida (f_w , adimensional).

6.2.3. O modelo HYDRUS-1D para a previsão das dinâmicas da água do solo, da transpiração e da evaporação do solo em condições salinas

O pacote de software HYDRUS (Šimůnek et al., 2008) foi já previamente utilizado para simular o fluxo de água e o transporte de solutos nas parcelas experimentais descritas no ponto 6.2.1 entre 2004 e 2009 (Ramos et al., 2011, 2012b). Assim, esses resultados serviram aqui como referência para avaliar as estimativas do balanço hídrico do solo em condições salinas dadas pelo SIMDualKc, dada a ausência de dados observados de $ET_{c\ act}$. No entanto, a abordagem de modelação seguida por Ramos et al. (2011, 2012b) foi ligeiramente modificada por forma a considerar apenas os fluxos unidimensionais, as condições superiores de fronteira (T_c e E_s) definidas com o modelo SIMDualKc para as estações de crescimento (2004-2009) das culturas, e para ultrapassar algumas das limitações encontradas nesses trabalhos anteriores. Consequentemente, apenas as modificações introduzidas são aqui descritas mais pormenorizadamente.

No HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 2013), o fluxo de água saturado foi calculado utilizando a equação de Richards, enquanto que o transporte de solutos foi definido utilizando a equação de convecção-dispersão (CDE). As propriedades hidráulicas não saturadas do solo utilizadas para resolver a equação de Richards foram descritas com as relações funcionais de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980). Este modelo necessita de seis parâmetros: os teores de água do solo ($m^3\ m^{-3}$) residual (θ_r) e à saturação (θ_s), a condutividade hidráulica saturada, K_{sat} ($cm\ d^{-1}$), o parâmetro de tortuosidade/conectividade dos poros, λ (-), e dois parâmetros de forma, α ($cm\ d^{-1}$) e η (-). A condutividade eléctrica da solução do solo (EC_{sw}) foi modelada com a CDE, considerando EC_{sw} como um marcador, i.e., sem considerar a adsorção de solutos à fase sólida do solo. Também a absorção de solutos pelas raízes foi considerada nula. Os parâmetros hidráulicos do solo e os valores da dispersividade adoptados são apresentados na Tabela 6.1. As metodologias utilizadas para a definição desses parâmetros

são descritas em Ramos et al. (2011).

O termo da extracção, S , incluído na equação de Richards (Šimůnek et al., 2013) foi calculado utilizando a abordagem macroscópica introduzida por Feddes et al. (1978). Nesta abordagem, T_c (mm d^{-1}) é distribuída ao longo da zona radicular utilizando a função de distribuição da densidade radicular normalizada, β (cm^{-1}), multiplicada pela função adimensional de resposta ao stress, α (h, h_θ, z, t), que leva em consideração os stresses hídrico e osmótico (Feddes et al., 1978; Skaggs et al., 2006a; Šimůnek e Hopmans, 2009):

$$S(h, h_\theta, z, t) = \alpha(h, h_\theta, z, t) S_p(z, t) = \alpha(h, h_\theta, z, t) \beta(z, t) T_c(t) \quad (6.2)$$

onde $S_p(z, t)$ e $S(h, h_\theta, z, t)$ são, respectivamente, os volumes potenciais e actuais de água removida por unidade de volume de solo e por unidade de tempo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$), $\alpha(h, h_\theta, z, t)$ é uma função adimensional do potencial da água do solo (h) e do potencial osmótico (h_θ) ($0 \leq \alpha \leq 1$), z é a coordenada espacial vertical (cm), e t é o tempo (d). Os valores de T_c e E_s foram no presente estudo calculados utilizando a abordagem dos K_c duais implementada no SIMDualKc, descrita no ponto 3.2.1 do Capítulo 3, e resumidamente na Fig. 6.3, enquanto que em Ramos et al. (2011) a partição destas duas componentes foi calculada a partir da ET_c como uma função do LAI e do correspondente ‘Factor de Cobertura do Solo’ (SCF), seguindo Ritchie (1972).

Também foi introduzido no presente estudo um mecanismo de compensação para calcular a taxa de transpiração compensada actual local, $T_{c \text{ act}}$ (mm d^{-1}), ao longo do domínio radicular, L_R (cm) (Jarvis, 1989; Šimůnek e Hopmans, 2009):

$$T_{c \text{ act}}(t) = \frac{T_c(t)}{\max[\omega(t), \omega_c]} \int_{L_R} \alpha(h, h_\theta, z, t) \beta(z, t) \partial z \quad (6.3)$$

onde $\omega(t)$ é o índice de stress hídrico adimensional, também designado por factor de adaptabilidade das raízes, representando um valor limite acima do qual a redução da absorção de água pelas raízes em partes ‘stressadas’ da zona radicular é totalmente compensada pelo aumento da extracção noutras partes, e ω_c é um valor crítico do índice de stress hídrico ($0 < \omega_c \leq 1$). Quando $\omega_c \leq \omega(t)$, não existe compensação da absorção radicular, caso contrário, obtém-se a compensação (Skaggs et al., 2006a; Šimůnek e Hopmans, 2009). Šimůnek and Hopmans (2009) colocaram a hipótese das plantas agrícolas poderem ter um valor relativamente alto de ω_c sendo portanto limitada a sua capacidade para compensar stresses naturais. No presente estudo, ω_c foi adicionalmente estabelecido com base no

tratamento de rega e na quantidade de águas salinas aplicada durante cada estação de crescimento. Assumiu-se que as plantas da parcela NS apenas precisariam de compensação para o stress hídrico, enquanto que as plantas da parcela HS necessitariam adicionalmente de compensar o aumento do stress osmótico em partes da zona radicular.

Os efeitos dos stresses hídrico e salino foram considerados como sendo multiplicativos, i.e., $\alpha(h, h_0) = \alpha_1(h) \alpha_2(h_0)$ (van Genuchten, 1987). As reduções na absorção de água pelas raízes devido ao stress hídrico, $\alpha_1(h)$, foram descritas utilizando uma função ‘em forma de S’ desenvolvida por van Genuchten (1987):

$$\alpha_1(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^{p1}} \quad (6.4)$$

onde h_{50} é a pressão (cm) para a qual a extracção de água pelas raízes é reduzida em 50%, e $p1$ é um coeficiente empírico adimensional. A Eq.(6.4) foi utilizada neste estudo em vez do modelo de Feddes et al. (1978), utilizado por Ramos et al. (2011), devido às elevadas dotações de rega que foram aplicadas (a dotação máxima foi de 66 mm) e à dificuldade em calibrar os parâmetros da pressão deste último modelo, particularmente em condições próximas da saturação, que poderia conduzir a uma sobrestimativa da T_c devido ao ‘encharcamento’ do solo.

A redução da extracção de água pelas raízes devido ao stress salino, $\alpha_2(h_0)$, foi descrita usando a função ‘limiar-declive’ de Maas e Hoffman (1977):

$$\alpha_2(h_0) = 1 \quad \text{para } EC_{sw} \leq EC_{sw \text{ threshold}} \quad (6.5a)$$

$$\alpha_2(h_0) = 1 - (EC_{sw} - EC_{sw \text{ threshold}})0.01b \quad \text{para } EC_{sw} > EC_{sw \text{ threshold}} \quad (6.5b)$$

Este modelo foi também utilizado por Ramos et al. (2011) e constitui a base da abordagem implementada no modelo SIMDualKc (Eq. 3.12 do ponto 3.2.4 do Capítulo 3, e Fig. 6.3).

6.2.4. Calibração e validação do modelo SIMDualKc e configuração do modelo HYDRUS-1D

O modelo SIMDualKc foi utilizado para calcular o balanço hídrico do solo diário durante cada estação de crescimento das culturas. O modelo foi em primeiro lugar calibrado para as estações de crescimento de 2006 e 2009, respectivamente, para o milho e para o sorgo sacarino. Na parcela NS, a calibração do modelo, seguindo os procedimentos descritos por Pereira et al. (2015b), consistiu no ajustamento dos valores padrão de K_{cb} e p das culturas relativos aos diferentes estádios de desenvolvimento, dos parâmetros da evaporação do solo

(Z_e , TEW e REW) e dos parâmetros da função paramétrica da percolação profunda (a_D e b_D) (Tabela 6.4) até os desvios entre os teores de água do solo (SWC) simulados e observados serem minimizados, ou seja, os erros de estimação não sofrerem alterações significativas de uma iteração para a seguinte. Um procedimento de tentativa e erro foi adotado. Começou-se por ajustar progressivamente os valores de $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$ e $K_{cb\ end}$, e dos parâmetros p_{ini} , p_{mid} e p_{end} . Depois, os parâmetros de percolação profunda a_D e b_D foram ajustados e num terceiro passo ajustaram-se Z_e , REW e TEW. Por fim, os valores de K_{cb} e p relativos às diferentes fases do desenvolvimento foram novamente ajustados até os erros serem minimizados. Na parcela salinizada HS, adoptaram-se os parâmetros previamente ajustados da cultura (K_{cb} e p), da evaporação do solo (Z_e , REW e TEW), e da percolação profunda (a_D e b_D) e a calibração focou-se nos parâmetros relativos à sensibilidade da cultura à salinidade. Os parâmetros padrão $EC_e\ threshold$ e b (Ayers e Westcot, 1986; Rhoades et al., 1992; Hoffman e Shalhevet, 2007; Grieve et al., 2012) foram assim ajustados até que a maior concordância entre os valores de SWC simulados e observados fosse atingida. O modelo SIMDualKc assim calibrado foi então validado usando os dados experimentais relativos a ambas as parcelas NS e HS para o milho em 2004 e 2005, e para o sorgo em 2008. Assumiu-se $f_w = 1.0$ para o milho porque toda a superfície do solo foi humedecida, enquanto que para o sorgo, $f_w = 0.4$.

Tabela 6.4. Parâmetros iniciais (padrão) e calibrados utilizados pelo modelo SIMDualKc.

Parâmetros	Iniciais		Calibrados	
	Milho	Sorgo sacarino	Milho	Sorgo sacarino
Cultura:				
$K_{cb\ ini}$	0.15	0.15	0.07	0.07
$K_{cb\ mid}$	1.15	1.15	1.18	1.00
$K_{cb\ end}$	0.15	0.35	0.15-0.25	0.3-0.45
p_{ini}	0.55	0.55	0.55	0.50
p_{mid}	0.55	0.55	0.55	0.50
p_{end}	0.80	0.80	0.80	0.80
$EC_e\ threshold$ (dS m ⁻¹)	1.7	6.8	1.7	4.2
b (%/dS m ⁻¹)	12	16	12	16
Solo:				
Z_e (m)	0.15		0.10	
TEW (mm)	39		27	
REW (mm)	9		9	
Percolação:				
a_D (mm)	350		335	
b_D	-0.0173		-0.0100	

K_{cb} , coeficiente cultural de base nos estádios inicial (ini), médio, (mid) e no final do ciclo de crescimento (end); p , fração de depleção da água do solo em conforto hídrico; $EC_e\ threshold$, limiar de tolerância das culturas à condutividade elétrica do extrato de saturação do solo; b , percentagem de redução da produção por unidade de aumento de EC_e ; Z_e , espessura da camada evaporativa do solo; TEW, total de água evaporável; REW, água facilmente evaporável; a_D e b_D , parâmetros empíricos da função paramétrica da percolação profunda.

A configuração do HYDRUS-1D foi levada a cabo seguindo Ramos et al. (2011, 2012b). Os mesmos parâmetros de entrada, como sejam os parâmetros hidráulicos do solo ou da dispersividade do solo, foram utilizados. No entanto, como descrito no ponto 6.2.3, pequenas modificações foram introduzidas na abordagem de modelação: i) as condições superiores de fronteira foram definidas com base nos valores de T_c e E_s calculados com o modelo SIMDualKc calibrado para as condições NS; ii) os mesmos parâmetros da tolerância das culturas à salinidade ($EC_{e\text{ threshold}}$, b) obtidos pela calibração do SIMDualKc para as condições salinas HS (Tabela 6.4) foram adoptados no HYDRUS-1D, não antes da sua conversão em EC_{sw} , como exigido pelo modelo, depois assumindo que a razão EC_{sw}/EC_e (k_{EC}) toma o valor 2, o que é uma aproximação comum usada para teores de água do solo próximos da capacidade de campo em solos de textura média (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954; Skaggs et al., 2006b); iii) o valor de $p1$ foi igualado a 3, tal como recomendado por van Genuchten e Gupta (1993) e Šimůnek et al. (2013), enquanto que o valor de h_{50} foi fixado em -4000 cm para o milho, seguindo Oster et al. (2012). Para o sorgo, o valor de h_{50} foi definido a uma pressão inferior (-6000 cm) devido à sua menor exigência em água e maior eficiência no uso da água (Steduto et al., 1997; Mastrorilli et al., 1999). Os parâmetros de h_{50} e $p1$ foram testados primeiro com os dados de campo de 2006 (para o milho) e de 2009 (para o sorgo), e depois validados durante as restantes estações de crescimento das culturas; iv) o parâmetro ω_c foi concebido para variar entre parcelas e estações de crescimento dependendo da quantidade de águas doce e salina aplicadas (Tabela 6.2), do valor de EC dessas águas (EC_{iw} , Tabela 6.2), dos stresses osmóticos produzidos, e da assumida necessidade das plantas em compensar estes stresses. Na parcela NS, o parâmetro ω_c foi definido como 0.9 devido às elevadas dotações de rega aplicadas ao longo das estações de crescimento e dos muito ligeiros stresses hídricos e osmóticos produzidos, sendo assim reduzida a necessidade de compensação. Na parcela salinizada HS, ω_c foi fixado em 0.85 (em 2004), 0.80 (em 2005) e 0.55 (em 2006) para o milho, e 0.80 (em 2008) e 0.60 (em 2009) para o sorgo, com os valores mais baixos (maior compensação) a serem associados a uma pior qualidade da água de rega (Tabela 6.2). As estimativas do SIMDualKc para $T_{c\text{ act}}$ foram também utilizadas como referência para calibrar ω_c e verificar se aquelas poderiam ser aproximadas utilizando uma abordagem mais complexa tal como a do HYDRUS-1D, dada a ausência de dados experimentais de $T_{c\text{ act}}$.

A calibração e a validação dos modelos foi feita através da comparação dos valores observados de SWC com os valores simulados de SWC pelo SIMDualKc e pelo HYDRUS-1D recorrendo a várias medidas quantitativas do ajuste da modelação. Os indicadores escolhidos para avaliar a qualidade do ajustamento, para além dos já definidos no Capítulo 4, i.e., o erro quadrático médio (RMSE, mm), o erro relativo médio (ARE, mm), e a eficiência da modelação (EF), foram os seguintes: a razão entre RMSE e o desvio padrão dos dados observados (RSR), o erro relativo médio (MRE) e a percentagem de enviesamento (PBIAS). Considerando que O_i e P_i são, respectivamente, os valores observados e previstos pelos modelos no instante i , que \bar{O} e \bar{P} os respectivos valores médios, e que n é o número de observações, esses indicadores são dados por:

$$RSR = \frac{RMSE}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (6.6)$$

$$MRE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \quad (6.7)$$

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (6.8)$$

valores de b_0 próximos de 1 indicam que os valores previstos estão estatisticamente próximos dos observados; valores de R^2 próximos de 1 indicam que o modelo explica correctamente a variância das observações. Valores de RMSE, RSR, MRE, e PBIAS próximos de zero indicam pequenos erros de estimativa e boas previsões do modelo (Legates and McCabe, 1999; Moriasi et al., 2007; Wand et al., 2012). Valores positivos ou negativos de PBIAS referem-se, respectivamente, à ocorrência de desvios por subestimação ou sobrestimação. Valores de EF, a eficiência de modelação de Nash e Sutcliffe (1970), próximos de 1 indicam que o erro quadrático médio ($MSE = RMSE^2$) é muito menor do que a variância dos dados observados, logo que as previsões dadas pelo modelo são boas; pelo contrário, quando EF é próximo de zero ou negativo, significa que não há vantagem em usar o modelo, i.e., que o valor médio \bar{O} das observações é tão bom ou melhor indicador do que o modelo.

6.3. Resultados

6.3.1. Calibração e validação dos modelos. Dinâmicas do teor de água do solo

As Fig. 6.4 e 6.5 comparam, respectivamente, os valores do teor da água do solo (SWC) simulados pelo SIMDualKc com os valores observados de SWC durante as estações de crescimento do milho e do sorgo sacarino, nas parcelas NS e HS. No milho, o valor de SWC

desceu abaixo de θ_p (i.e., o valor de SWC quando a depleção da água do solo iguala RAW) em ambas as parcelas NS e HS apenas durante a fase de crescimento rápido de 2005 (Fig. 6.4c, d), e na parcela HS em 2006 (Fig. 6.4f), verificando-se ainda que a parcela HS ressentiu-se ligeiramente do efeito da redução da disponibilidade de água devido à salinidade, representado por TAW_{salt} e RAW_{salt} , (tal como descrito pelas Eqs. 3.13 a 3.16, ponto 3.2.4, Capítulo 3, e na Fig. 6.3 do presente capítulo). Na Fig. 6.4, pode constatar-se que durante o período médio (*mid-season*) e no período da senescência das culturas (*late-season*), apesar da rega ter sido abundante, os efeitos de salinidade na redução de TAW e RAW são evidentes. No sorgo sacarino essa redução é menos pronunciada do que no milho (Fig. 6.5), devido à sua maior tolerância à salinidade.

O SIMDualKc teve um bom desempenho na simulação de SWC em ambas as parcelas HS e NS e para as três estações de crescimento do milho (Fig. 6.4 e Tabela 6.5). O coeficiente da regressão forçada à origem b_0 foi próximo de 1, indicando que os valores de SWC previstos pelo modelo ficaram muito próximos dos observados. Os valores de R^2 foram elevados (0.86-0.99), mostrando que o modelo foi capaz de explicar a variabilidade dos dados observados. Os erros de estimativa foram muito baixos, com RMSE a assumir valores entre 0.005 e 0.012 $m^3 m^{-3}$, e RSR entre 0.024 e 0.088. Os valores de MRE foram muito baixos, não ultrapassando os 3.33%. O PBIAS variou entre 0.57 e 2.79%, o que indica que não houve subestimação ou sobrestimação dos valores de SWC observados. A eficiência da modelação EF foi elevada, superior a 0.85, indicando que o erro quadrático médio foi muito mais pequeno do que a variância dos dados observados. A comparação dos indicadores da qualidade do ajustamento relativos aos tratamentos NS e HS mostrou que os erros de estimação RMSE e MRE foram ligeiramente maiores para o tratamento salino, embora o PBIAS tenha sido ligeiramente menor. Relativamente a b_0 , R^2 , RSR e EF, as diferenças entre os tratamentos não foram significativas.

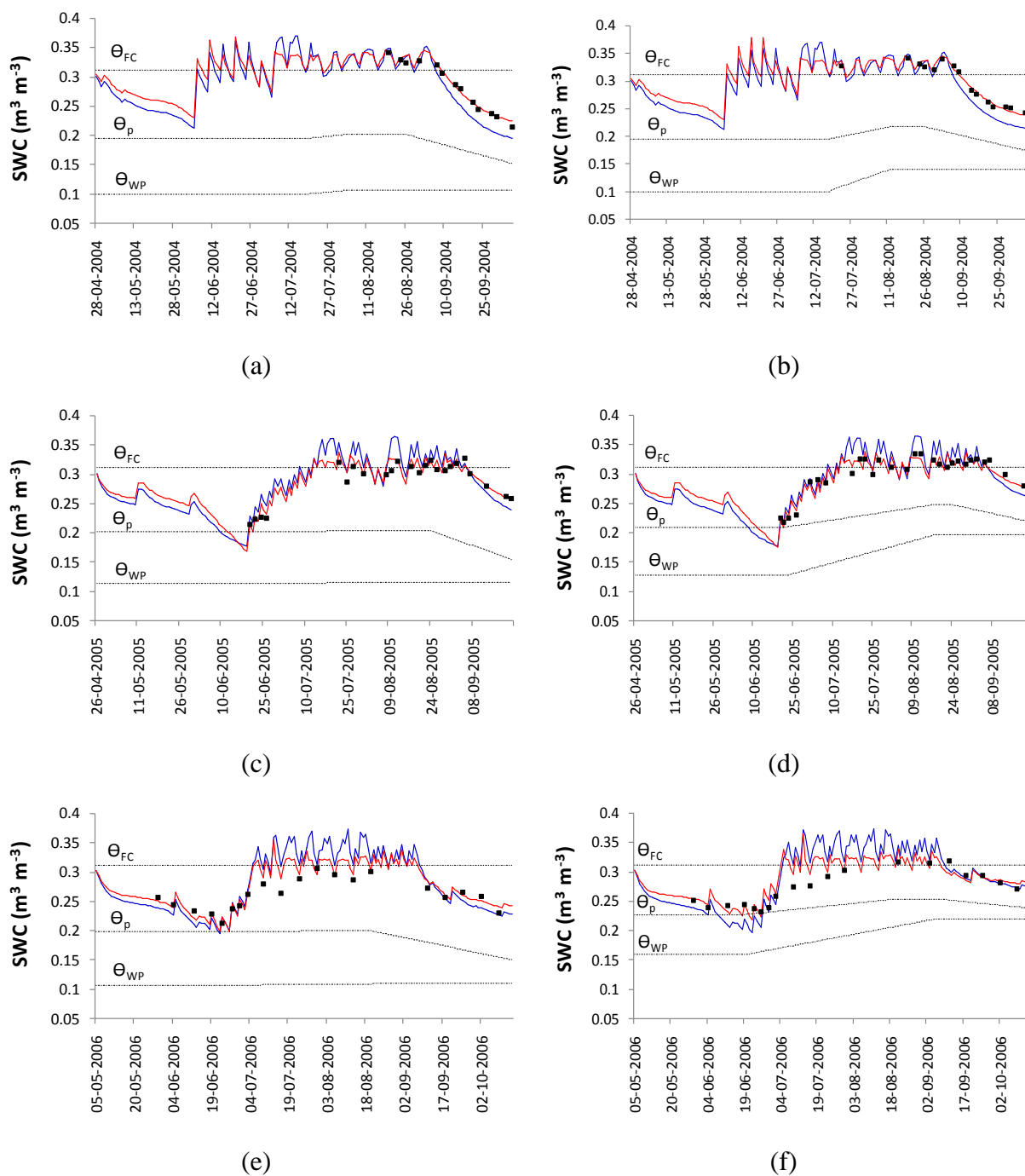


Fig. 6.4. Teores da água do solo (SWC) observados (\blacksquare) e simulados pelos modelos SIMDualKc (—) e HYDRUS-1D (—) sob condições não salinas, NS (a, c, e), e salinas HS (b, d, f) ao longo das estações de crescimento de 2004 a 2006 do milho.

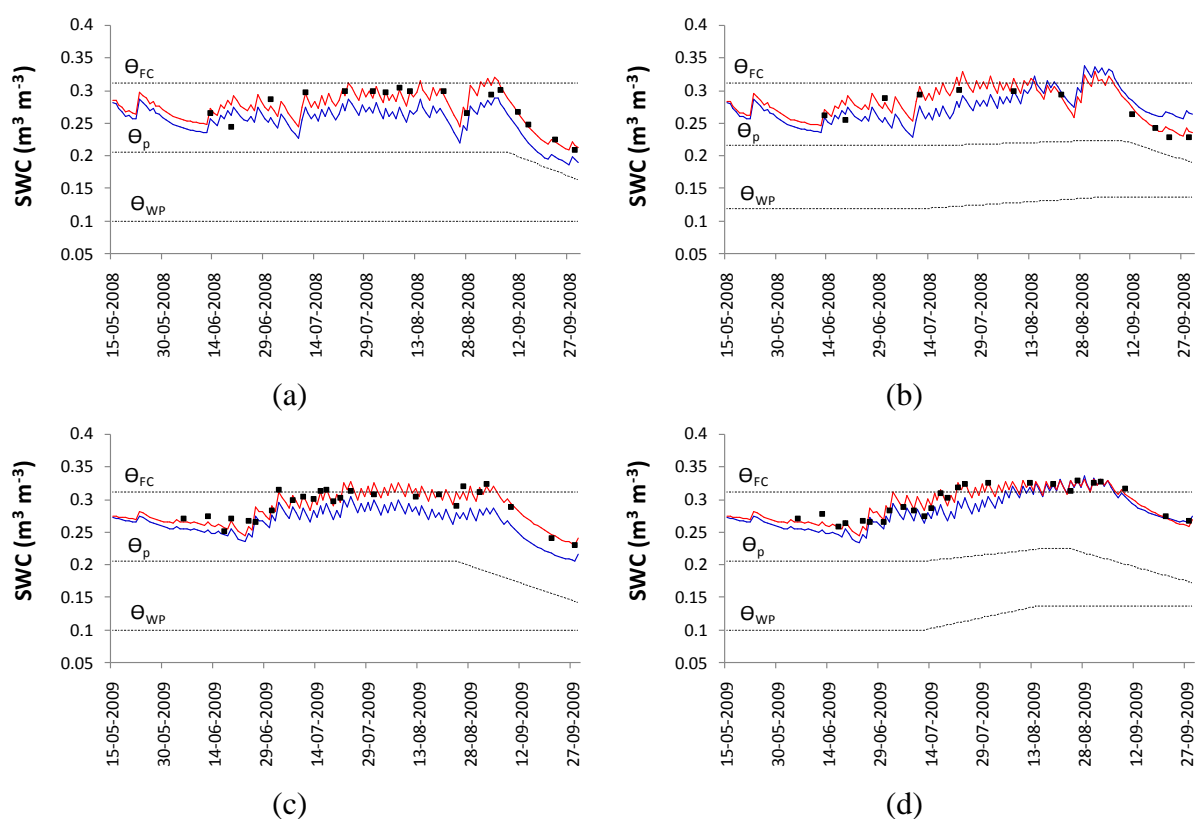


Fig. 6.5. Teores da água do solo (SWC) observados (■) e simulados pelos modelos SIMDualKc (—) e HYDRUS-1D (—) sob condições não salinas, NS (a, c), e salinas HS (b, d) ao longo das estações de crescimento de 2008 e 2009 do sorgo sacarino.

Tabela 6.5. Indicadores da qualidade do ajustamento entre os valores do teor de água do solo (SWC) simulados pelo SIMDualKc e os observados.

Cultura	Ano	Tratamento	n (-)	b ₀ (-)	R ² (-)	RMSE (m ³ m ⁻³)	RSR (-)	MRE (%)	PBIAS (%)	EF (-)
Milho	2004	NS	13	0.99	0.987	0.005	0.035	1.41	0.75	0.98
		HS	15	0.99	0.981	0.006	0.042	1.85	0.71	0.97
	2005	NS	24	0.97	0.937	0.012	0.069	3.23	2.79	0.89
		HS	29	0.99	0.932	0.010	0.049	2.42	0.57	0.93
	2006	NS	20	0.99	0.878	0.010	0.084	3.09	1.27	0.86
		HS	19	0.99	0.860	0.011	0.088	3.33	0.88	0.85
Sorgo	Todos os casos	-	120	0.99	0.940	0.010	0.024	2.66	1.22	0.93
	2008	NS	17	1.00	0.877	0.010	0.092	2.44	0.43	0.86
		HS	11	0.97	0.896	0.012	0.135	3.68	2.98	0.80
	2009	NS	26	0.99	0.880	0.009	0.071	2.48	0.92	0.87
		HS	26	1.00	0.921	0.008	0.056	2.04	0.29	0.92
	Todos os casos	-	80	0.99	0.895	0.009	0.038	2.49	0.88	0.89

n, número de observações; b₀, coeficiente da regressão linear forçada à origem; R², coeficiente de determinação; MAE, erro absoluto médio; RMSE, erro quadrático médio; RSR, razão entre RMSE e o desvio padrão dos dados observados; MRE, erro relativo médio; PBIAS, percentagem de enviesamento; EF, eficiência da modelação.

Tabela 6.6. Indicadores da qualidade do ajustamento entre os valores do teor de água do solo (SWC) simulados pelo HYDRUS-1D e os observados.

Cultura	Ano	Tratamento	n (-)	b ₀ (-)	R ² (-)	RMSE (m ³ m ⁻³)	RSR (-)	MRE (%)	PBIAS (%)	EF (-)
Milho	2004	NS	13	0.94	0.992	0.021	0.137	7.20	6.22	0.75
		HS	15	0.96	0.985	0.019	0.126	5.93	4.89	0.76
	2005	NS	24	1.04	0.894	0.018	0.103	5.24	-3.66	0.75
		HS	29	1.04	0.902	0.019	0.098	4.77	-3.73	0.72
	2006	NS	20	1.01	0.964	0.012	0.105	3.98	-0.91	0.78
		HS	19	0.99	0.968	0.015	0.120	5.27	1.16	0.73
	Todos os casos	-	120	1.01	0.901	0.018	0.043	5.22	-0.36	0.78
Sorgo	2008	NS	17	0.92	0.978	0.024	0.217	8.57	8.52	0.20
		HS	11	0.98	0.315	0.022	0.254	7.14	-1.52	0.29
	2009	NS	26	0.93	0.914	0.023	0.175	7.35	7.39	0.20
		HS	26	0.96	0.901	0.015	0.107	4.22	3.97	0.70
	Todos os casos	-	80	0.94	0.796	0.021	0.084	6.61	5.69	0.44

n, número de observações; b₀, coeficiente da regressão linear forçada à origem; R², coeficiente de determinação; MAE, erro absoluto médio; RMSE, erro quadrático médio; RSR, razão entre RMSE e o desvio padrão dos dados observados; MRE, erro relativo médio; PBIAS, percentagem de enviesamento; EF, eficiência da modelação.

Para o caso do sorgo, os indicadores da qualidade do ajustamento das previsões do SIMDualKc para SWC (Fig. 6.5 e Tabela 6.5) também demonstraram uma boa concordância com os valores observados. b₀ também foi próximo de 1 e os valores de R² (0.88-0.92) foram elevados, mostrando assim que o modelo foi capaz de prever o SWC ao longo de ambas as estações de crescimento da cultura. Os erros de estimação foram bastante baixos, com RMSE entre 0.008 e 0.012 m³ m⁻³, e RSR variando 0.11-0.25, ainda assim mais elevados do que para o milho. Os valores de PBIAS apresentaram uma gama de variação semelhante à do milho, indicando a ausência de tendências para a subestimação ou sobrestimação dos valores de SWC observados. Por fim, a EF foi também elevada (>0.80), embora ligeiramente menor do que para o milho. A comparação dos indicadores da qualidade do ajustamento relativamente aos tratamentos NS e HS mostrou a verosimilhança de ambos, sendo melhor a qualidade do ajustamento para a parcela NS no ano da calibração (2008) e melhor em 2009 para a parcela HS. Pode pois concluir-se que o modelo SIMDualKc foi devidamente calibrado para ambas as culturas demonstrando a capacidade de prever correctamente as dinâmicas da água do solo para os ensaios com o milho e com o sorgo, tanto em condições salinas como não salinas. Para além disso, no geral, os valores dos indicadores da qualidade do ajustamento ficaram próximos dos obtidos em outras aplicações da abordagem dos K_c duais e do SIMDualKc em particular (por exemplo, Zhao et al., 2013; Paredes et al., 2014; Gao et al., 2014; Cancela et al., 2015).

O desempenho do HYDRUS-1D na simulação de SWC para a cultura do milho (Fig. 6.4 e Tabela 6.6) não demonstrou uma tendência óbvia para a sobrestimação ou subestimação dos valores observados, tal como é evidenciado pelos valores de b_0 e PBIAS. Embora b_0 e R^2 não tenham diferido de um modelo para outro, PBIAS foi consistentemente superior para o HYDRUS-1D, aspecto que é visível para todos os casos da Fig. 6.4. Consequentemente, os indicadores relativos aos erros de estimação RMSE, RSR e MRE atingiram valores mais elevados do que para o SIMDualKc, podendo no entanto também serem considerados baixos, uma vez que, sendo as abordagens seguidas pelos dois modelos muito diferentes, os valores destes indicadores não podem ser comparados directamente entre os dois modelos. Os valores da EF foram elevados, MRE foi muito inferior à variância dos valores observados de SWC, podendo pois assumir-se que o HYDRUS-1D foi capaz de simular o SWC para as estações de crescimento do milho em condições salinas e não salinas.

Os indicadores da qualidade do ajustamento relativos às simulações de SWC com o HYDRUS-1D para a cultura do sorgo sacarino não mostram resultados tão bons comparativamente à aplicação ao milho. O SWC foi ligeiramente subestimado, resultando em valores de b_0 e PBIAS, respectivamente, de 0.94 e 5.65%. Os valores de R^2 para o sorgo, variando entre 0.32 e 0.98, foram significativamente inferiores aos obtidos para o milho, indicando que as simulações do modelo foram menos capazes de explicar a variabilidade dos dados observados, em particular para parcela HS em 2008 (Fig. 6.5b). Os erros de estimação RMSE, RSR e MRE variaram, respectivamente, 0.015-0.024 m³ m⁻³, 0.107-0.2554, e 4.22%-8.54%. Os valores da EF variaram entre 0.20 e 0.70, com os valores mais baixos referindo-se às parcelas não salinas NS (Fig. 6.5a, c). Os resultados mostram que ambos os modelos tiveram um bom desempenho em simular as dinâmicas da água do solo. A maior complexidade do HYDRUS-1D em termos da discretização do domínio do solo, essencial para o estudo do transporte de solutos, revelou no entanto não ser necessária na simulação das dinâmicas do SWC para efeitos da programação da rega.

Dado que ambos os modelos usam os mesmos dados de entrada, i.e., a T_c potencial e a E_s , as diferenças encontradas ao nível do SWC entre os dois modelos estão provavelmente relacionadas com o modo como as dinâmicas da água do solo e dos sais foram calculadas, como o perfil do solo foi representado no domínio do modelo e com a maneira como os stresses matricial e osmótico simulados influenciaram os diferentes termos do balanço hídrico (ponto 6.3.4). O modelo SIMDualKc calculou um simples balanço hídrico a partir das entradas e saídas de água diárias (Fig. 6.3), enquanto que o HYDRUS-1D simulou o fluxo de

água recorrendo a soluções numéricas da equação de Richards. Assim, o SIMDualKc apenas requereu informação acerca de θ_{FC} e θ_{WP} para representar o domínio do solo, enquanto que o HYDRUS-1D exigiu uma descrição completa das curvas de retenção da água do solo ($\theta(h)$) e da condutividade hidráulica não saturada ($K(h)$). Para além disso, embora ambos os modelos descrevam o efeito da salinidade do solo em T_c usando abordagens baseadas no modelo de Maas e Hoffman (1977), o SIMDualKc requereu a disponibilidade de valores de EC_e medidos em determinados períodos para descrever a salinidade do solo, nomeadamente no início e no fim de cada campanha de rega. Por outro lado, o HYDRUS-1D necessitou de dados da EC_{iw} para calcular por si próprio o desenvolvimento das condições de salinidade do solo com a equação de convecção-dispersão (CDE).

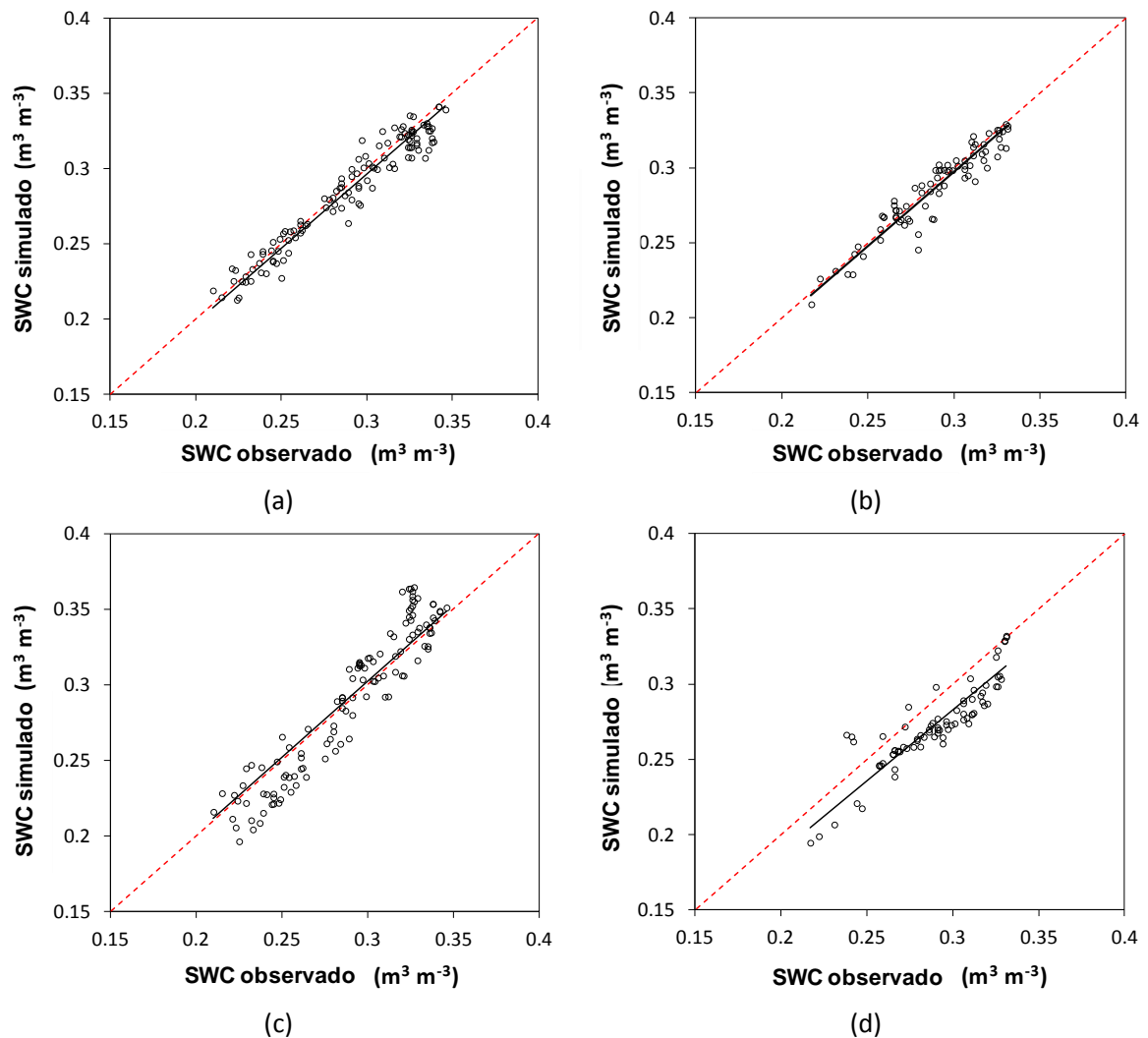


Fig. 6.6. Relação entre o teor de água do solo (SWC) observado e simulado considerando conjuntamente as estações de crescimento e condições de salinidade: a) estimativas do SIMDualKc para o milho; b) estimativas do SIMDualKc para o sorgo; c) estimativas do HYDRUS-1D para o milho; e d) estimativas do HYDRUS-1D para o sorgo (linha a tracejado corresponde à linha 1:1).

As diferenças entre as abordagens resultaram em diferenças nas estimativas de SWC por ambos os modelos (Fig. 6.6). Os valores de SWC simulados com o SIMDualKc, quando comparados com os valores observados (Fig. 6.6a e b) resultaram numa baixa dispersão dos pares de valores em torno da linha 1:1, correspondendo assim a uma capacidade de previsão muito boa. De forma diferente, as previsões com HYDRUS-1D mostram uma maior variância e estimativas ligeiramente enviesadas, embora as previsões possam ser consideradas boas. Apesar de tudo, estes valores dos indicadores da qualidade do ajustamento encontram-se dentro da gama de variação obtida noutros estudos de simulação do SWC utilizando diferentes versões do modelo HYDRUS (Skaggs et al., 2004; Kandelous et al., 2011; Wand et al., 2014; González et al., 2015), e são ligeiramente melhores do que os obtidos por Ramos et al. (2011, 2012b).

6.3.2. Coeficientes culturais duais

Na Fig. 6.7 apresentam-se os valores potenciais do coeficiente cultural de base (K_{cb}) já calibrados e ajustados às condições climáticas locais, os valores do K_{cb} actual ($K_{cb\ act}$) resultantes do ajustamento dos primeiros às condições de stress matricial e osmótico, e os valores do coeficiente de evaporação do solo (K_e) calculados pelo SIMDualKc para o milho cultivado em condições salinas e não salinas no período 2004-2006. Também foram incluídos na figura os eventos de precipitação e de rega. O valor calibrado de $K_{cb\ mid}$ para o milho ($K_{cb\ mid} = 1.18$, Tabela 6.4 e Fig. 6.7) foi igual ao tabelado por Allen et al. (1998) depois do ajustamento deste último ao clima do local e semelhante aos obtidos por Djaman e Irmak (2013), Shahrokhnia e Sepaskhah (2013), Zgao et al. (2013), e Paredes et al. (2014) em ambientes diversificados. O valor calibrado de $K_{cb\ end}$ ficou dentro do intervalo de variação esperado para o milho em situação de secagem completa dos grãos no campo. Já o valor calibrado de $K_{cb\ ini}$ foi metade do tabelado (Allen et al., 1998). Este valor é, ainda assim, aceitável, significando que a transpiração nesta fase foi muito baixa e que a evaporação residual do solo, decorrente da difusão de vapor a partir de camadas de solo mais profundas para a superfície, foi mais baixa do que a expectável para condições agronómicas e de rega típicas. O valor calibrado da fracção p foi o mesmo que o tabelado por Allen et al. (1998).

A Fig. 6.8 mostra as curvas do K_{cb} , $K_{cb\ act}$ e K_e para o sorgo sacarino, assim como os eventos de precipitação e de rega ocorridos durante as estações de crescimento de 2008 e 2009. Os valores de K_{cb} na Fig 6.8 são já os valores calibrados e ajustados ao clima, enquanto que os de $K_{cb\ act}$ resultaram do ajustamento dos primeiros aos stresses matricial e salino. O valor calibrado e ajustado ao clima de $K_{cb\ mid}$ para o sorgo doce ($K_{cb\ mid} = 1.0$, Tabela 6.4 e Fig. 6.8)

foi mais baixo do que os valores tabelados por Allen et al. (1998) e relatados por Tolk e Howell (2001), mas próximos dos valores obtidos por Piccinni et al. (2009); para além disso, $K_{cb\ mid}$ foi mais elevado do que os valores obtidos por Kato e Kamichika (2006) para sorgo de baixa densidade, e por Howell et al. (2008) para sorgo forrageiro. Tal como para o milho, o valor calibrado de $K_{cb\ ini} = 0.07$ foi metade do valor padrão. O valor de $K_{cb\ end}$ foi semelhante ao proposto por Allen et al. (1998) para sorgo para grão

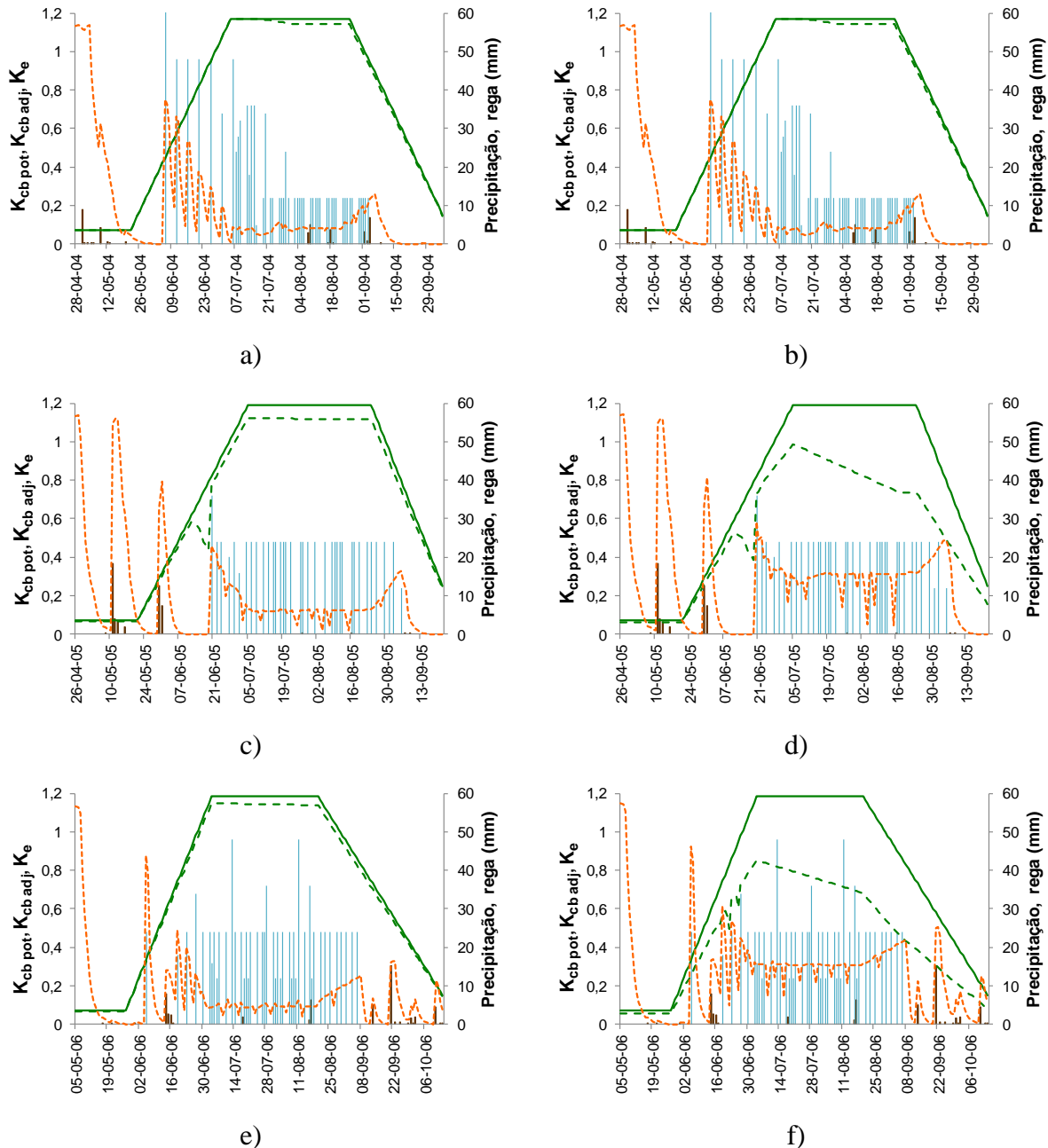


Fig. 6.7. Evolução dos valores do K_{cb} (—), $K_{cb\ act}$ (- - -), K_e (- - - -), precipitação (—■—), e rega (—■—) nas parcelas não salinas NS (a, c, e) e salinas HS (b, d, f) ao longo das estações de crescimento de 2004 a 2006 para a cultura do milho.

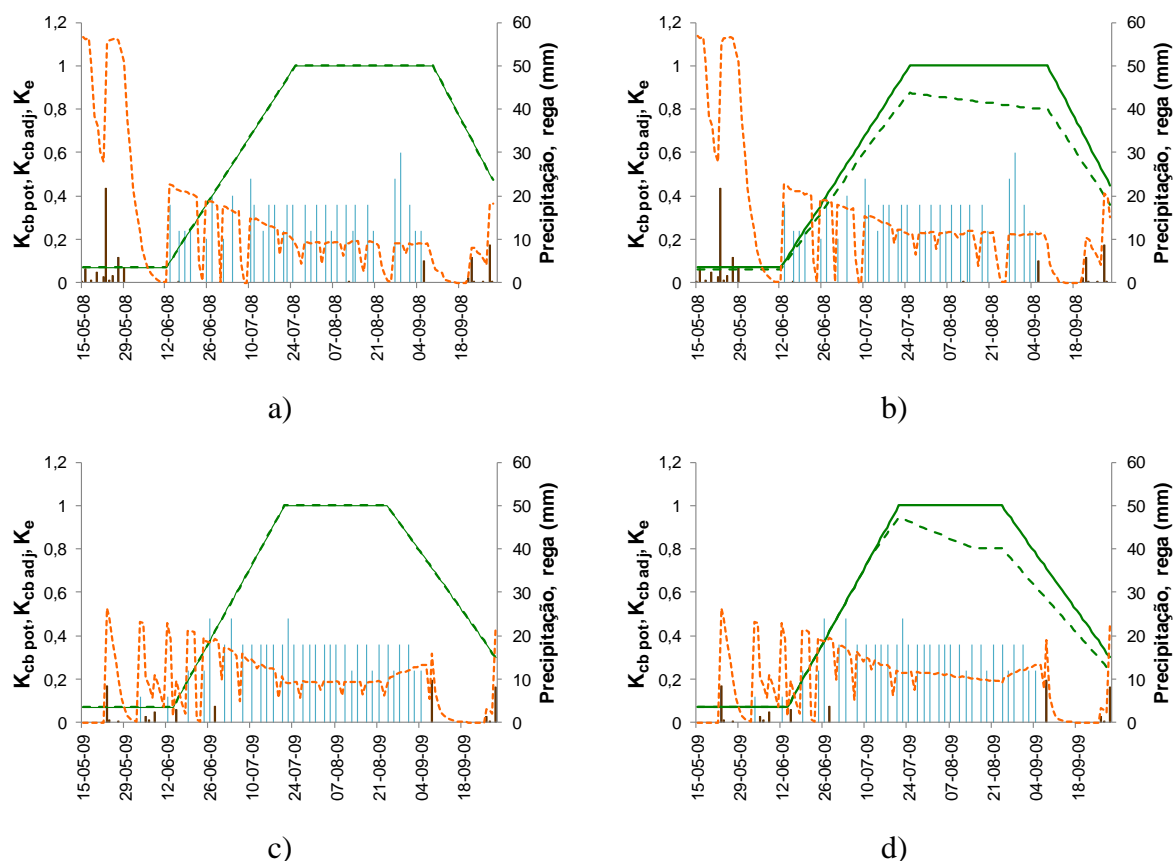


Fig. 6.8. Evolução dos valores do K_{cb} (—), $K_{cb\ act}$ (- - -), K_e (- - -), precipitação (—) e rega (—) nas parcelas não salinas NS (a, c) e salinas HS (b, d) ao longo das estações de crescimento de 2008 e 2009 para a cultura do sorgo sacarino.

O tratamento NS para a cultura do milho resultou numa pequena redução dos valores de K_{cb} em todas as estações de crescimento (Fig. 6.7a, c, e) uma vez que EC_e foi apenas ligeiramente superior a $EC_{e\ threshold}$ (Tabela 6.2) devido à EC_{iw} da água de rega (Tabela 6.2), que pode ser considerada como água de salinidade média (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954). Por outro lado, o tratamento com água de rega de salinidade máxima HS induziu um forte stresse osmótico, daí o maior afastamento entre $K_{cb\ act}$ e K_{cb} , que aumentou com o desenvolvimento da salinidade do solo ao longo dos anos (Fig. 6.7b, d, f) associada ao aumento de EC_{iw} (Tabela 6.2). Durante a fase inicial e no início da fase de crescimento rápido da cultura, altura em que a radiação disponível à superfície do solo foi elevada devido à reduzida f_c , K_e atingiu valores elevados, devido ao facto da camada evaporativa do solo se apresentar totalmente humedecida na altura da sementeira, pela ocorrência de precipitação, principalmente em 2005, e pela rega em 2004, que começou mais cedo. Com o decorrer da fase de crescimento rápido, a fracção da superfície do solo exposta à radiação diminuiu progressivamente, resultando numa diminuição do K_e mesmo havendo água disponível na camada superficial para a evaporação. Os valores mínimos de K_e foram obtidos durante o período médio, a f_c foi máxima. Durante

esta fase, K_e foi menor na parcela NS que apresentou uma maior f_c do que na parcela HS onde o stresse salino diminuiu o desenvolvimento da cultura e logo a f_c . Na fase final do ciclo de crescimento (*late-season*), K_e aumentou ligeiramente já que a f_c diminuiu devido à senescência das folhas.

Relativamente à cultura do sorgo sacarino, faz-se notar que o declínio de $K_{cb\ act}$ relativamente a K_{cb} para a parcela HS (Fig. 6.8b e d) foi menor do que o observado para o milho uma vez que o sorgo é mais tolerante à salinidade, ou seja, o seu valor de $EC_e\ threshold$ foi muito maior do que o do milho (Tabela 6.4). Pela mesma razão, nas parcelas NS ocorreu que $K_{cb\ act} = K_{cb}$, i.e., não houve stresse (Fig. 6.8a e c). Assim, a salinidade teve pouco efeito no desenvolvimento da cultura do sorgo e na expansão das folhas, como mostram as pequenas diferenças entre os valores de LAI_{max} observados nas parcelas HS e NS apresentados na Tabela 6.2. Como consequência, as diferenças no valor de K_e entre os tratamentos salinos e não-salinos foram muito menores do que para a cultura do milho (Fig. 6.7).

Em geral, os resultados obtidos para K_{cb} e K_e mostram que o SIMDualKc mostrou uma boa capacidade em simular os efeitos da rega e da salinidade nos valores de $K_{cb\ act}$, e de identificar bem as diferenças no valor de $K_{cb\ act}$ entre as parcelas NS e HS, bem como no valor de K_e para as culturas do milho e do sorgo sacarino.

6.3.3. Evaporação do solo e transpiração sob influência da salinidade e balanço hídrico

As Figs. 6.9 e 6.10 comparam os valores de ET_c e T_c , que foram comuns aos dois modelos, com os valores da $ET_{c\ act}$ e da $T_{c\ act}$ calculados pelo SIMDualKc e pelo HYDRUS-1D para o milho e para o sorgo sacarino. Os resultados para a parcela NS não são apresentados porque as reduções em ET_c e T_c foram desprezáveis para o milho e nulas para o sorgo (Figs. 6.7a, c, e; e Figs. 6.8a, c) apesar do valor de EC_{iw} da água doce aplicada (Tabela 6.2). Sob condições salinas, ambos os modelos estimaram valores de $ET_{c\ act}$ e $T_{c\ act}$ indubitavelmente menores do que ET_c e T_c devido à acumulação de sais ao longo de cada estação de crescimento do milho e do sorgo sacarino. Para ambas as culturas, o afastamento entre $ET_{c\ act}$ e ET_c , e entre $T_{c\ act}$ e T_c tornou-se progressivamente maior ao longo de cada estação de crescimento e de uma estação para a seguinte, devido ao aumento da salinidade do solo e dos correspondentes valores de EC_e (Tabela 6.2). Esse afastamento foi particularmente notório para o milho: $T_c - T_{c\ act} = 35\text{mm}$ no primeiro ano dos ensaios, aumentando até 216 mm no terceiro ano devido ao aumento da salinidade. Para o sorgo doce, por outro lado, não se verificou o aumento de $T_c - T_{c\ act}$ entre as estações de crescimento de 2008 e 2009, devido à sua maior tolerância à

salinidade.

Para o milho, este afastamento progressivo de uma estação de crescimento para a seguinte deveu-se à baixa precipitação durante o inverno, nomeadamente em 2004-2005 (Ramos et al., 2011), levando assim a um aumento da salinidade do solo entre estações. O SIMDualKc estimou uma diminuição da razão $ET_{c\ act}/ET_c$, de 0.98 para 0.84, e uma redução da razão $T_{c\ act}/T_c$ de 0.93 para 0.64 de 2004 a 2006 (Tabela 6.7). As estimativas do HYDRUS-1D para o mesmo período apresentaram as mesmas tendências, dando origem a maiores reduções dos rácios $ET_{c\ act}/ET_c$ e $T_{c\ act}/T_c$, respectivamente, de 0.99 para 0.66, e de 0.95 para 0.55 (Tabela 6.8). As reduções do valor de T_c devido à salinidade do solo foram maiores que as reduções de ET_c , já que o aumento da salinidade do solo reduziu o crescimento das plantas e do LAI; assim, o coeficiente de stresse K_s teve efeito no valor de K_{cb} , e portanto na transpiração, e não no de K_e . No entanto, o stresse salino promoveu um aumento da evaporação do solo, que compensou parcialmente as reduções de T_c em termos do consumo total de água, i.e., $ET_{c\ act}$. Por esta razão no tratamento HS, E_s foi de 142 mm em 2004, apenas 16% maior do que no tratamento NS, aumentando para 223 mm em 2006, 83% maior do que o valor estimado de E_s para condições não-salinas (Tabelas 6.7 e 6.8). Para o sorgo sacarino, o SIMDualKc calculou um valor constante para $ET_{c\ act}/ET_c$ (0.92) em ambas as estações de crescimento de 2008 e 2009 (Tabela 6.7), enquanto que o HYDRUS-1D mostrou apenas uma ligeira variação (0.80-0.82) (Tabela 6.8). O rácio $T_{c\ act}/T_c$ apresentou o mesmo comportamento.

A percolação profunda teve um papel importante no balanço hídrico do solo no caso do milho por ter sido aplicada água de rega em excesso. Nos tratamentos não-salinos, NS, as estimativas do SIMDualKc para o valor de DP variaram entre 27% (2005) e 37% (2004) de P+I, com HYDRUS-1D a obter valores semelhantes (Tabelas 6.7 e 6.8). Nos tratamentos salinos, HS, ambos os modelos obtiveram valores de DP mais elevados, com as estimativas do SIMDualKc entre 32% e 42% de P+I, enquanto que as de HYDRUS-1D variaram entre 38% e 48% de P+I. Este aumento de DP relaciona-se com o facto de o aumento da pressão osmótica ter conduzido a uma menor extracção de água pelas raízes nos tratamentos HS, o que significou mais água perdida abaixo da zona radicular. Para o sorgo, DP foi baixa quando comparado com a ocorrida para o milho, devido às menores dotações de rega aplicadas. No entanto, as estimativas do HYDRUS-1D para DP em tratamentos salinos (13% de P+I) foram relativamente maiores do que as dados pelo SIMDualKc (7.5% de P+I), o que pode explicar parcialmente a subestimação das estimativas de SWC pelo HYDRUS-1D (Fig. 6.5). Apesar disso, a diferença entre os dois modelos é pequena e deve-se às diferenças nas abordagens

computacionais, tendo sido por isso o HYDRUS-1D bastante útil como referência para o SIMDualKc.

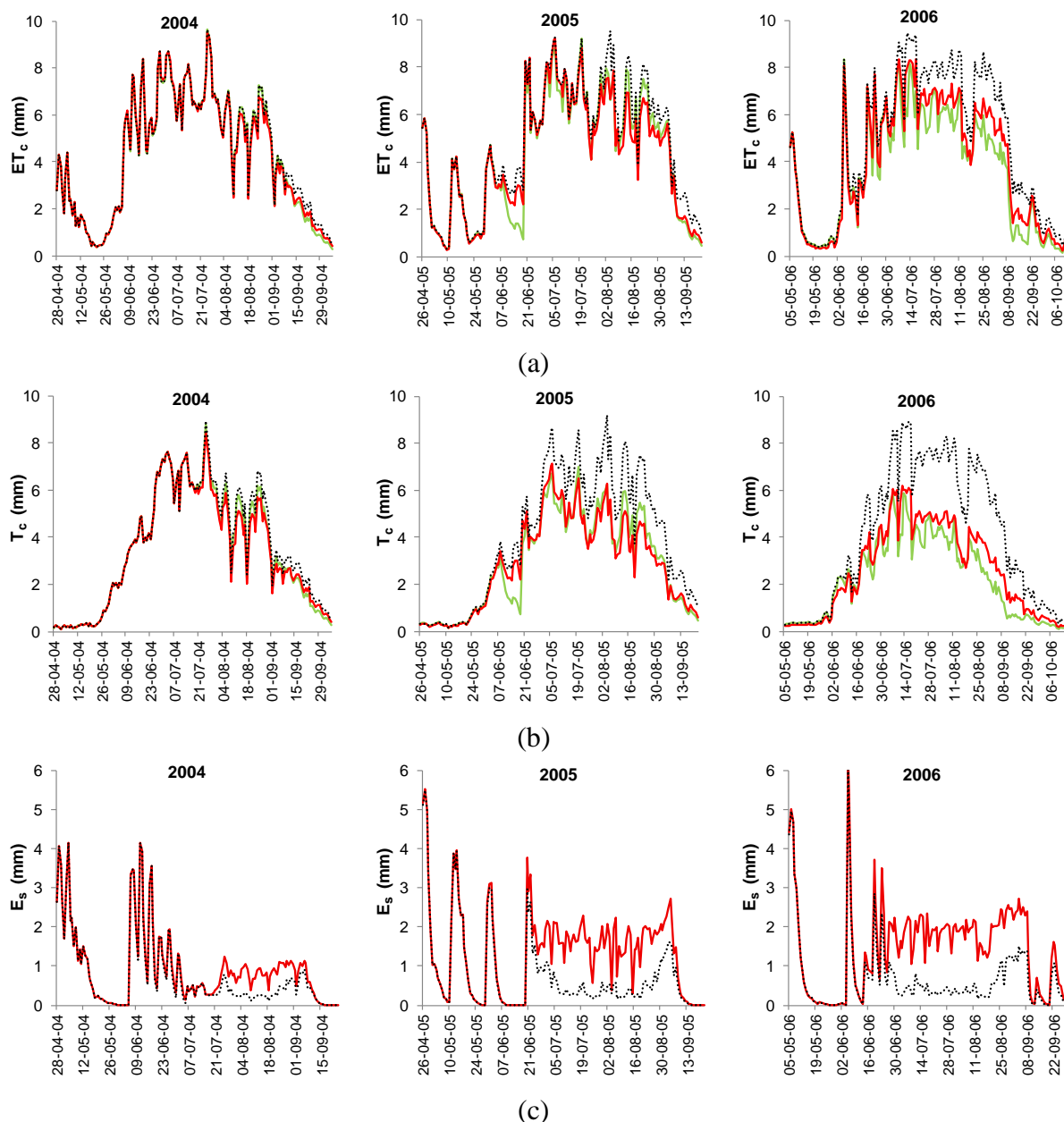


Fig. 6.9. Valores potenciais, ou não salinos (.....) vs. valores actuais (com stress salino) simulados pelo SIMDualKc (—) e pelo HYDRUS-1D (—) de: (a) evapotranspiração cultural (ET_c e $ET_{c\ act}$), (b) transpiração (T_c e $T_{c\ act}$), e (c) evaporação do solo (E_s) para a cultura do milho entre 2004 e 2006.

Os valores de SWC no fim de cada estação de crescimento foram maiores em condições salinas do que em condições não-salinas (Figs. 6.4 e 6.5; Tabelas 6.7 e 6.8). No SIMDualKc, os valores simulados de SWC finais foram de $0.014\text{--}0.043\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ e $0.022\text{--}0.029\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ mais altos na parcela HS do que na parcela NS, respectivamente, para a cultura do milho e do sorgo sacarino. O HYDRUS-1D revelou a mesma tendência, facto que é explicado pela maior

difficuldade que as plantas tiveram em extrair água do solo sob condições osmóticas intensas.

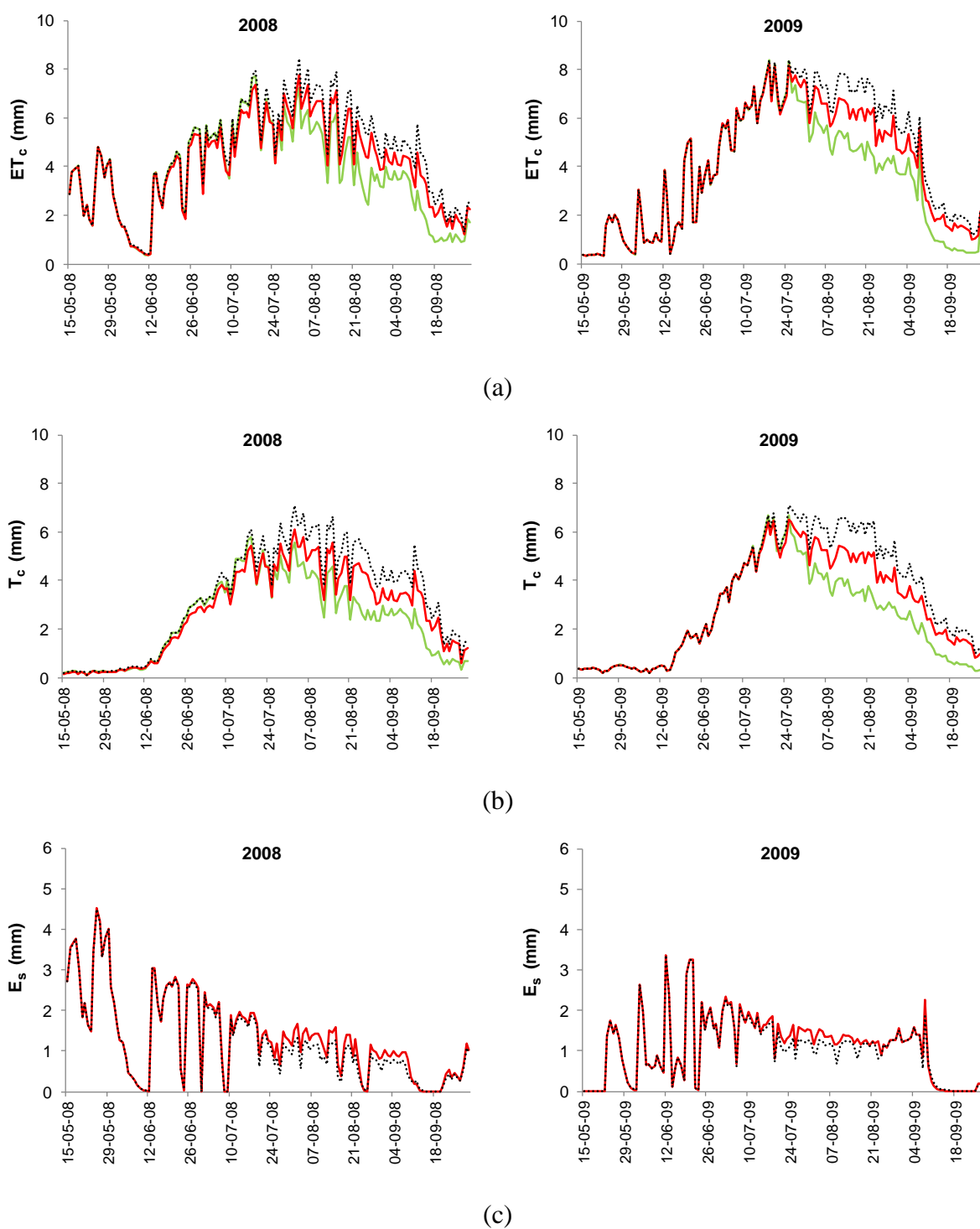


Fig. 6.10. Valores potenciais, ou não salinos (.....) vs. valores actuais (com stress salino) simulados pelo SIMDualKc (—) e pelo HYDRUS-1D (—) de: (a) evapotranspiração cultural (ET_c e $ET_{c\ act}$), (b) transpiração (T_c e $T_{c\ act}$), e (c) evaporação do solo (E_s) para a cultura do sorgo sacarino em 2008 e 2009.

Tabela 6.7. Termos do balanço hídrico do solo simulados pelo modelo SIMDualKc para as culturas do milho e do sorgo sacarino nas parcelas muito salinizadas (HS) e não salinas (NS).

Termos	Unidades	Milho				Sorgo					
		2004		2005		2006		2008		2009	
		NS	HS	NS	HS	NS	HS	NS	HS	NS	HS
P	mm	38.9		48.1		52.6		62.8		40.1	
I	mm	997		864		1028		522		546	
Δ SWC	$m^3 m^{-3}$	0.08	0.066	0.044	0.025	0.060	0.020	0.073	0.049	0.033	0.005
DP	mm	386	393	249	288	363	454	6	44	5.7	35
	DP/(P+I)	0.37	0.38	0.27	0.32	0.34	0.42	0.01	0.08	0.01	0.06
$ET_{c\ act}$	mm	701	686	695	644	758	643	626	573	601	555
	$ET_{c\ act}/ET_c$		0.98		0.90		0.84		0.92		0.92
$T_{c\ act}$	mm	579	544	558	438	636	420	448	382	458	403
	$T_{c\ act}/T_c$		0.93		0.74		0.64		0.85		0.88
E_s	mm	122	142	136	207	122	223	177	191	143	150
	$E_s/E_{s\ NS}$		1.16		1.52		1.83		1.08		1.06

P, precipitação; I, rega; Δ SWC, variação do teor de água do solo; DP, percolação profunda; ET_c , evapotranspiração cultural potencial; $ET_{c\ act}$, evapotranspiração cultural actual; T_c , transpiração potencial; $T_{c\ act}$, transpiração actual; E_s , evaporação do solo; $E_{s\ NS}$, evaporação do solo no tratamento de salinidade mínima NS.

Tabela 6.8. Termos do balanço hídrico do solo simulados pelo modelo HYDRUS-1D para as culturas do milho e do sorgo sacarino nas parcelas muito salinizadas (HS) e não salinas (NS).

Termos	Units	Milho				Sorgo					
		2004		2005		2006		2008		2009	
		NS	HS	NS	HS	NS	HS	NS	HS	NS	HS
P	mm	38.9		48.1		52.6		62.8		40.1	
I	mm	997		864		1028		522		546	
Δ SWC	$m^3 m^{-3}$	0.114	0.095	0.076	0.054	0.087	0.042	0.096	0.024	0.058	0.001
DP	mm	399	396	255	298	370	521	22	76	34	99
	DP/(P+I)	0.39	0.38	0.28	0.33	0.34	0.48	0.04	0.13	0.06	0.17
$ET_{c\ act}$	mm	707	698	699	643	762	583	625	522	590	485
	$ET_{c\ act}/ET_c$		0.96		0.80		0.66		0.82		0.80
$T_{c\ act}$	mm	585	556	563	436	640	360	448	331	447	335
	$T_{c\ act}/T_c$		0.95		0.73		0.55		0.74		0.73
E_s	mm	122	142	136	207	122	223	177	191	143	150
	$E_s/E_{s\ NS}$		1.16		1.52		1.83		1.08		1.06

P, precipitação; I, rega; Δ SWC, variação do teor de água do solo; DP, percolação profunda; ET_c , evapotranspiração cultural potencial; $ET_{c\ act}$, evapotranspiração cultural actual; T_c , transpiração potencial; $T_{c\ act}$, transpiração actual; E_s , evaporação do solo; $E_{s\ NS}$, evaporação do solo no tratamento de salinidade mínima NS.

4. Conclusões

O modelo SIMDualKc simulou com sucesso o SWC em parcelas cultivadas com milho e sorgo sacarino, regadas com águas doces e salinas (sintéticas) utilizando a abordagem dos K_c duais para calcular a evapotranspiração cultural (ET_c). O modelo foi capaz de calcular as diminuições de ET_c e de T_c devido ao stresse salino usando uma abordagem baseada no teor de água do solo, no valor de EC_e no início e no fim de cada estação de crescimento, na

tolerância das culturas à salinidade do solo ($EC_{e\text{ threshold}}$ e b), e na disponibilidade de água no solo sob condições salinas, TAW_{salt} e RAW_{salt} . Para além disso, os resultados mostram que a abordagem usada pelo SIMDualKc, um modelo de balanço hídrico do solo, pode ser utilizada para apoiar a programação da rega em condições salinas, e que o modelo HYDRUS-1D constituiu uma referência apropriada para as estimativas do balanço hídrico com o SIMDualKc.

A abordagem utilizada pelo SIMDualKc revelou-se adequada para a partição da $ET_{c\text{ act}}$ em $T_{c\text{ act}}$ e E_s sob condições salinas. Os resultados mostraram que a $T_{c\text{ act}}$ diminuiu quando a salinidade aumentou, e que E_s aumentou, em particular no caso do milho, mais sensível à salinidade. O aumento de E_s ocorreu possivelmente devido a um menor desenvolvimento das plantas sob stresse salino, e portanto devido à menor cobertura da superfície do solo pela cultura e uma maior quantidade de energia disponível à superfície do solo que favorece a evaporação. A capacidade de partição da ET pelo modelo tem particular interesse para entender o comportamento das culturas quando a ET é influenciado pela salinidade.

O modelo estimou reduções nulas ou desprezáveis da ET_c e da T_c tanto para o milho como para o sorgo sacarino cultivados sob condições não-salinas. No entanto, sob condições salinas, o SIMDualKc estimou reduções dos rácios $ET_{c\text{ act}}/ET_c$ e $T_{c\text{ act}}/T_c$ devido ao stress salino até, respectivamente, 0.16 e 0.36. As estimativas do balanço hídrico do solo pelo SIMDualKc foram replicadas de perto pelo HYDRUS-1D usando uma abordagem mais complexa, no entanto com as estimativas de $ET_{c\text{ act}}$ e $T_{c\text{ act}}$ dadas por ambos os modelos a ficarem mais próximas no caso do milho do que no caso do sorgo sacarino. Assim, a nova abordagem implementada no SIMDualKc para o cálculo das reduções de ET_c e T_c devido ao stress salino pode ser considerada fidedigna. Desta forma, o SIMDualKc representa uma ferramenta interessante para a calendarização e gestão da rega em condições salinas, nomeadamente em regiões com escassez de água.

Capítulo 7

O Sistema SIMDualKc-SIG para a modelação das necessidades hídricas das culturas e apoio à gestão da rega ao nível do projecto.

7.1. Introdução

Tal como patente nos Capítulos 4, 5 e 6 e nas inúmeras aplicações do modelo referidas no ponto 3.4 do Capítulo 3, o SIMDualKc presta-se a estudos de modelação do balanço hídrico do solo, do uso da água pelas culturas, da evapotranspiração cultural (ET_c), e da partição desta entre a transpiração das culturas (T_c) e a evaporação do solo (E_s), sob diversas condições ambientais, de gestão das culturas, do solo e da rega, visando um leque variado de objectivos específicos. No entanto, todos estes estudos focam a análise à escala da parcela, como não poderia deixar de ser dado ser este o nível de discretização espacial inerente à natureza conceptual do modelo. Assim, para cada ‘corrida’ do SIMDualKc é necessário assumir que as variáveis e parâmetros das culturas, do solo, clima, águas subterrâneas, sistemas de rega, etc., são homogêneos no espaço, sendo deste modo um modelo que, no domínio da hidrologia, é designado de tipo ‘agregado’ ou *lumped*, ao contrário dos modelos espacialmente distribuídos que consideram a variação espacial daquelas variáveis (Yao et al., 1998; Carpenter e Georgakakos, 2006). A utilização de modelos de simulação do balanço hídrico do solo e da ET_c , como o SIMDualKc, não se esgota obviamente nas aplicações à escala da parcela, extendendo-se o interesse da sua utilização a outros níveis de discretização espacial, nomeadamente para a gestão da rega à escala do projecto de rega. Assim, uma vez que no modelo os procedimentos e as funções de cálculo se encontram em módulos separados dos módulos de classe que implementam as interfaces gráficas que os invocam, isto permite que o SIMDualKc, com as devidas modificações e adaptações, possa ser conectado, ou que interaja, com outras aplicações informáticas e outras bases de dados, nomeadamente os SIG e as BD georreferenciadas, possibilitando assim com recurso às capacidades dos SIG, a estimação da distribuição espacial da ET_c , T_c , E_s , DP, CR e das necessidades de rega, assim como dos valores acumulados destas variáveis ao nível do projecto de rega ou para apenas um sector deste. A isto acresce o facto do modelo utilizar a abordagem dos K_c duais ($K_c = K_{cb} + K_e$) para o cálculo da ET_c (Allen et al., 1998), calculando separadamente a transpiração da cultura (T_c) e a evaporação do solo (E_s), o que faz com que o coeficiente cultural de base (K_{cb}), representando a T_c , e portanto correlacionado com a quantidade de vegetação, possa ser estimado através de índices de vegetação (IV) obtidos por detecção remota (D’Úrso e Calera

Belmonte, 2006; González-Dugo et al., 2009; Campos et al., 2010). Assim no presente capítulo descreve-se o desenvolvimento do sistema SIMDualKc-SIG, que consiste basicamente, numa barra de ferramentas que pode ser adicionada às versões 10.0 ou superiores do *software* ArcMap (ESRI, Redlands, California) e que possui uma série de comandos (botões) destinados a: 1) aceder e manipular programaticamente os objectos do ArcMap (o mapa, as *shapefiles*, o geoprocessador, etc.); 2) invocar diferentes interfaces gráficas para a inserção de dados (das culturas, clima, solo, sistemas de rega e gestão da rega) na BD não espacial da aplicação; 3) mandar executar o geoprocessamento de dados (clima, solos e parcelas); 4) proceder à leitura das tabelas *.dbf* com as datas e os valores dos IV para cada parcela (para cálculo do K_{cb}); 5) executar as demais operações de selecção, combinação e leitura de *layers* geográficos necessários ao cálculo do balanço hídrico do solo e das necessidades de rega das culturas; e 6) apresentar os resultados.

Para demonstrar mais explicitamente as valências do uso do sistema SIMDualKc-SIG, este foi aplicado ao bloco de rega 10 do projecto de rega *Sinistra-Ofanto*, na região da Apúlia, sul da Itália. Avaliou-se a capacidade do sistema em capturar os efeitos combinados da densidade ou fracção de cobertura das culturas (f_c), calculada através dos IV obtidos por detecção remota (e daí o K_{cb} e a T_c), do tipo de solo e do clima sobre as necessidades de rega das culturas. Procedeu-se ao mapeamento dos resultados acumulados da ET_c , T_c , E_s e necessidades de rega para as estações de crescimento de 2012 e 2013 ao nível do bloco de rega e calcularam-se os valores acumulados médios daquelas variáveis para cada cultura. O hidrógrafo da procura para a rega para o bloco de rega 10 foi também calculado em 2013 e 2014.

7.2. Integração do SIMDualKc com o SIG

7.2.1. Abordagem seguida para a integração

A ligação do SIMDualKc ao SIG, mais concretamente à versão 10 do *software* ArcGIS, foi efectuada adoptando uma estratégia de ‘acoplamento próximo’ que, embora exija um maior esforço de programação e seja mais problemática ao nível da compatibilização da aplicação com os diferentes softwares comerciais de SIG, proporciona uma maior rapidez e autonomia na execução dos cálculos, além de providenciar um ambiente gráfico no SIG para uma mais fácil utilização da aplicação (Aggett e McColl, 2008; Jiang et al., 2015). Assim, utilizando a linguagem de programação *Visual Basic .Net* (Microsoft Visual Studio 2008), foi criado um novo projecto do tipo *Class Library* destinado a constituir uma barra de ferramentas para ser adicionada ao ArcMap, com uma série de comandos (botões) que acedem programaticamente

às propriedades e métodos dos objectos do ArcGIS, associada a uma *DLL* (*dynamic link library*) criada aquando da compilação do projecto. i.e., uma colecção compilada de procedimentos e funções, que é chamada em tempo de execução pela barra de ferramentas por forma a apresentar as interfaces gráficas para a inserção de dados na BD da aplicação e a efectuar os cálculos pretendidos.

Este novo projecto compõe-se de várias *classes*, destinadas a:

- i) alojar os vários procedimentos e funções de cálculo da versão *stand-alone* (i.e., autónoma) original do SIMDualKc, depois das devidas adaptações;
- ii) chamar os executáveis extraídos da versão *stand-alone*, depois de devidamente modificados para um funcionamento autónomo, que implementam as interfaces gráficas para a introdução na BD não espacial dos dados das culturas, do solo, clima, sistemas de rega e programação da rega;
- iii) implementar uma nova interface gráfica e respectivo código associado para a introdução na BD não espacial dos parâmetros da função de cálculo da f_c e do K_{cb} a partir dos valores médios dos índices de vegetação (IV) para cada parcela;
- iv) implementar novas interfaces gráficas e respectivo código associado para executar o geoprocessamento dos dados, como sejam:
 - a criação de uma rede de estações meteorológicas virtuais e a interpolação espacial dos dados climáticos das estações reais para as virtuais;
 - a atribuição a cada parcela do ‘clima’ e do solo mais representativo, criando-se através deste procedimento a ‘Tabela de Simulação’, contendo as identificações (IDs) das parcelas, culturas, solos, estações meteorológicas virtuais, sistemas de rega, opções de gestão da rega, e mais informação, tal como descrito no ponto 7.2.3;
- v) implementar uma nova interface gráfica e respectivo código associado para seleccionar a Tabela de Simulação e a tabela *.dbf* contendo as datas e os valores médios dos IV em cada parcela, por forma a calcular os valores de f_c e K_{cb} e a executar o cálculo do balanço hídrico do solo e das necessidades de rega para cada parcela, culminando na criação duma *shapefile* e respectiva tabela de atributos com os resultados acumulados do balanço hídrico para todas as parcelas, i.e., a ‘Tabela de Resultados’;
- vi) implementar uma nova interface gráfica e respectivo código associado para calcular o hidrograma da procura para a rega relativo a um determinado sector de rega seleccionado.

O projecto foi então compilado, gerando assim o já mencionado ficheiro *.dll* e outro ficheiro do tipo *.tlb* (*type library*), este último guardando a informação sobre as propriedades e métodos dos objectos do ArcGIS, e que vai constituir a própria barra de ferramentas depois de ser adicionado ao ArcMap.

O sistema SIMDualKc-SIG implementa, por agora, apenas uma pequena parte das opções de simulação da versão *stand-alone*, contemplando apenas a simulação do uso da água pelas culturas, da ET_c , da partição desta em T_c e E_s , e a geração de calendários de rega em função das opções de gestão da rega (orientada à máxima produção, rega deficitária ou sem rega) e das características dos sistemas de rega (dotação máxima de rega e fracção da superfície do solo humedecida pela rega, f_w).

7.2.2. Bases de dados

A base de dados (BD) não espacial do sistema SIMDualKc-SIG destina-se a guardar em diferentes tabelas todos os dados das culturas, solos, clima, sistemas de rega, opções de gestão da rega e parâmetros da função de cálculo da f_c a partir dos IVs, necessários para executar o balanço hídrico do solo, sendo estes dados fornecidos pelo utilizador através das interfaces gráficas do sistema. Esta informação é apresentada Tabela 7.1. Uma vez que todos estes dados de entrada, à excepção dos parâmetros da função f_c -VI, foram já descritos no Capítulo 3, destacam-se no presente capítulo apenas as alterações feitas à BD necessárias ao funcionamento do sistema SIMDualKc-SIG. Assim, as datas do início dos estádios de desenvolvimento das culturas, tal como descrito no ponto 3.3.3 do Capítulo 3, necessárias ao traçado da curva do K_{cb} , da fracção p , da profundidade radicular e da altura da cultura, foram substituídas pela duração (em dias) desses mesmos estádios (Tabela 7.1). Isto deveu-se ao facto de que, havendo um número muito elevado de parcelas ao nível do projecto de rega ou de um sector deste, é natural que surjam diferenças nas datas de plantação ou da iniciação das novas folhas (no caso de culturas perenes) para uma mesma cultura e consequentemente nas datas das fases de desenvolvimento. Assim, no sistema SIMDualKc-SIG, o utilizador, aquando da introdução dos dados relativos à cultura na respectiva tabela da BD não espacial, começa por introduzir previamente as durações dos estádios de desenvolvimento das culturas e só depois, quando criada a Tabela de Simulação (ver ponto 7.2.1), introduz nesta as datas de plantação ou da iniciação de novas folhas, podendo fazê-las variar para a mesma cultura, possibilitando assim à aplicação calcular da curva do K_{cb} independentemente das datas de plantação especificadas.

Tabela 7.1. Dados de entrada na base de dados não espacial do sistema SIMDualKc-SIG.

Tabela dos dados meteorológicos
Precipitação efectiva diária, P_e (mm)
Evapotranspiração de referência diária, ET_o (mm)
Humidade relativa mínima diária, RH_{min} (%)
Velocidade do vento diária a 2 m de altura, u_2 ($m\ s^{-1}$)
Tabela dos dados do solo
Para todo o domínio do solo (para calcular o total de água disponível do solo - TAW, mm)
Nº de camadas ou horizontes do solo e sua espessura
Teor de água à capacidade de campo para cada camada, θ_{FC} ($cm^3\ cm^{-3}$)
Teor de água no ponto de emurchecimento para cada camada, θ_{WP} ($cm^3\ cm^{-3}$)
Para a camada superficial evaporativa do solo
Espessura da camada evaporativa do solo, Z_e (m)
Total de água evaporável, TEW (mm)
Água facilmente evaporável, REW (mm)
Tabela dos dados da cultura
Duração (dias) dos estádios inicial, crescimento rápido, período médio e final (senescência)
Profundidade radicular, Z_r (m) no início de cada estádio
Altura da cultura, h (m), no início de cada estádio
Fracção da depleção da água do solo sem stresse, p , no início de cada estádio
Fracção de cobertura do solo, f_c , no início de cada estádio, ou nas datas em que f_c é medido
Modo de cálculo da curva do K_{cb}
K_{cb} já representam a densidade actual da cultura:
Especificação dos valores de $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$ e $K_{cb\ end}$
K_{cb} referentes a condições de cobertura total (necessitam de ajustamento à densidade actual):
Especificação dos valores de $K_{cb\ full\ ini}$, $K_{cb\ full\ mid}$ e $K_{cb\ full\ end}$
Especificação dos valores de $f_{c\ ini}$, $f_{c\ mid}$ e $f_{c\ end}$, ou nas datas em que f_c é medido.
Especificação dos valores de h_{ini} , h_{mid} e h_{end} , ou nas datas em que h é medido.
Parâmetro M_L (ET relativa máxima for unidade de solo sombreado)
Parâmetro $K_{c\ min}$ (evaporação residual do solo)
Factor de resposta água-produção, K_y (-).
Tabela dos dados do sistema de rega
Dotação máxima de rega (mm)
Fracção da superfície do solo humedecida (f_w)
Tabela dos dados da gestão/programação da rega
Rega orientada à máxima produção (sem stresse hídrico)
MAD expresso em termos de % de TAW nas fases de desenvolvimento ou em períodos específicos
Rega deficitária (com stresse hídrico)
MAD expresso como: $p + \%(1 - p)$, nas fases de desenvolvimento ou em períodos específicos
Dotação de rega
Dotações fixas em cada estádio de desenvolvimento embora variáveis entre eles
Dotações variáveis em função do armazenamento de água (%TAW) que se pretende atingir
Tabela dos dados para o cálculo da f_c a partir dos índices de vegetação (IV)
Valor máximo de IV para cada cultura
Valor mínimo de IV para cada cultura
Modo de cálculo da f_c no início da estação de crescimento (1, 2)
Se modo 2, especificar $f_{c\ ini}$ como % de $f_{c\ mid}$
Modo de cálculo da f_c no fim da estação de crescimento (1, 2, 3)
Se modo 2, especificar $f_{c\ end}$ como % de $f_{c\ mid}$

Também ao nível da gestão da rega foram introduzidas alternativas para a especificação destes dados, uma vez que se constatou que o procedimento actualmente disponível na versão *stand-alone* do SIMDualKc não conseguia simular certas práticas de gestão da rega específicas de algumas culturas, nomeadamente quanto à oportunidade temporal em que stresses hídricos são deliberadamente impostos a essas culturas. Assim, desenvolveu-se um novo procedimento para a especificação do MAD em rega deficitária, expressando-o à mesma como uma determinada percentagem da fracção $(1 - p)$ da água disponível no solo (i.e., $MAD = p + \%(1 - p)$), mas especificando de uma forma mais flexível os períodos para os quais se pretende impor um determinado valor de MAD, definindo-os em termos do ‘número de dias após a plantação’ (DAP) a que correspondem o início e o fim dos períodos, tal como exemplificado na Fig. 7.1.

Designação dos períodos	Desde DAP	Até DAP	MAD % $(1-p)$
Período 1	0	30	25
Período 2	31	90	0
Período 3	91	120	40

Fig. 7.1. Novo procedimento para a especificação de valores de MAD para rega deficitária em períodos cujo início e fim são definidos em termos do número de dias após a plantação (DAP).

Por forma a possibilitar o cálculo da f_c e do K_{cb} a partir de índices de vegetação (IV) obtidos por detecção remota, foi criada uma nova tabela destinada a guardar os parâmetros da função de cálculo utilizada, que são os valores mínimos (VI_{min}) e máximos (VI_{max}) do IV para cada uma das culturas (Tabela 7.1). Para além dos valores destes parâmetros, esta tabela guarda também as opções e os dados para o cálculo da f_c à data da plantação e na data final da estação de crescimento para cada cultura. Esta informação deve ser guardada com uma determinada designação (ID) atribuída ao campo (ou atributo) *Fc_IV_ID*.

Quanto à BD espacial, o modelo utilizado pelo sistema SIMDualKc-SIG é o modelo de dados geo-relacional, utilizado por exemplo pelas *shapefiles* ou *coverages*, dois formatos de dados espaciais da ESRI já antigos mas ainda amplamente utilizados. Este modelo difere do modelo *geodatabase*, que o veio substituir, na medida em que, contrariamente a este último, armazena os dados geográficos e os atributos destes num sistema dividido: os dados geográficos propriamente ditos são armazenados em ficheiros gráficos e os atributos numa base de dados relacional (*dBase* ou *.dbf*), estando estas duas componentes sincronizadas pela utilização de

um mesmo nome, por forma a serem pesquisadas, analisadas e apresentadas em uníssono (Chang, 2008). A base de dados SIG/espacial é composta pelos seguintes temas:

- Um tema de polígonos com a delimitação das parcelas agrícolas, cuja tabela de atributos associada possui o código de identificação da parcela (*Field_ID*), da cultura cultivada na parcela (*Crop_ID*) e do respectivo sistema de rega (*IrriSysID*);
- Um tema de polígonos com a delimitação dos tipos de solo, cuja tabela de atributos associada possui o código de identificação do solo (*Soil_ID*);
- Um tema de pontos com a localização das estações meteorológicas, cuja tabela de atributos associada possui o código de identificação da estação (*Station_ID*);

As culturas, os sistemas de rega, os solos e as estações meteorológicas destes temas da BD espacial relacionam-se com os dados das culturas, dos sistemas de rega, dos solos e das estações meteorológicas guardados nas tabelas da BD não espacial através da utilização de um valor comum dado ao ‘atributo identificador’ (ID) (Fig. 7.2).

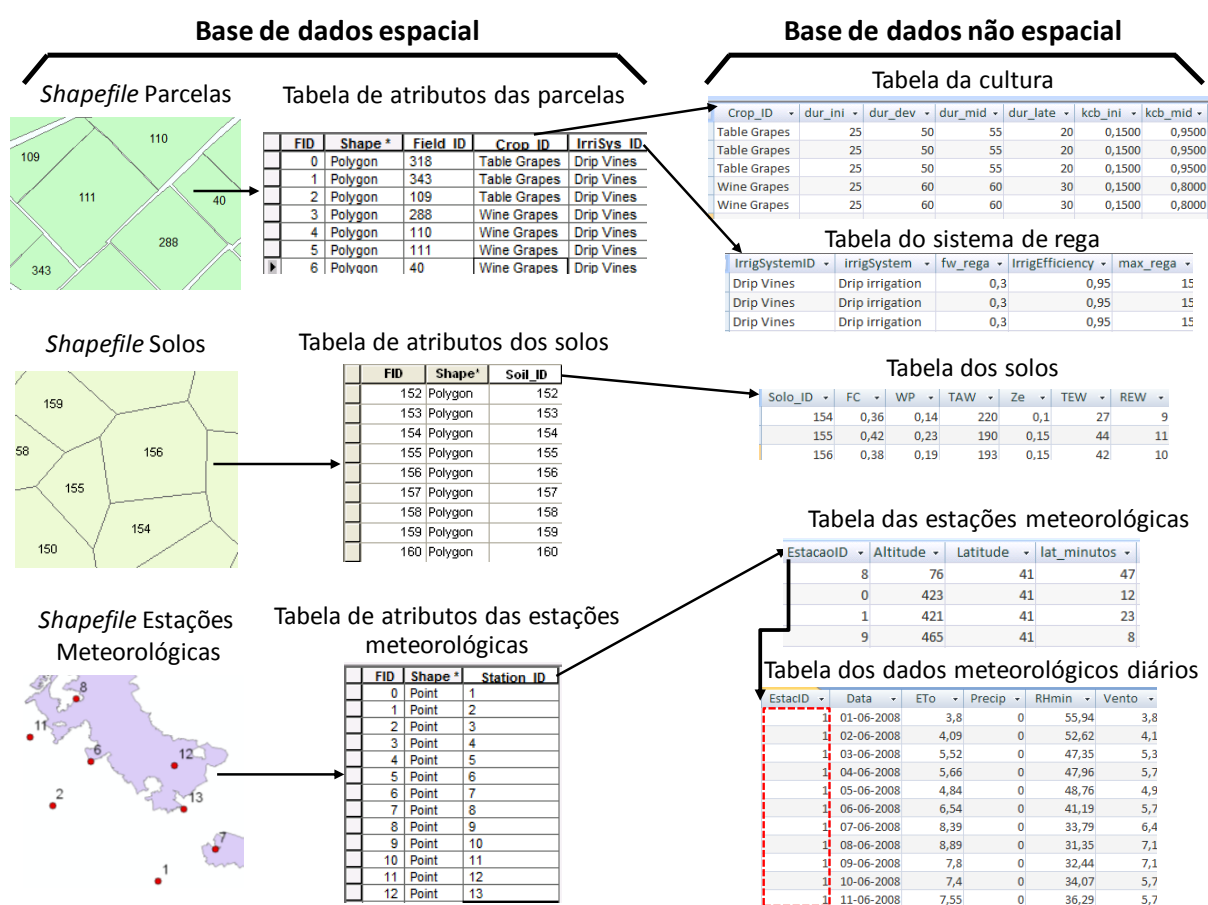


Fig. 7.2. Esquema com as bases de dados espaciais e não espaciais e as respectivas inter-relações.

7.2.3. Operações de geoprocessamento

O geoprocessamento dos dados geográficos/espaciais constitui a parte fundamental do sistema SIMDualKc-SIG. Como já referido no ponto 7.2.1, as operações de geoprocessamento necessárias ao funcionamento do sistema referem-se a: a) criação de uma rede de estações meteorológicas virtuais afecta ao bloco de rega e interpolação espacial dos dados meteorológicos das estações reais circundantes para as estações virtuais; e b) atribuição a cada parcela do solo e da estação meteorológica virtual dominantes.

As operações de geoprocessamento referidas acima foram primeiro construídas utilizando o *Model Builder*, uma aplicação do ArcMap que permite combinar em série as várias ferramentas disponíveis no *ArcToolBox* por forma construir uma ferramenta mais complexa, i.e., um sistema em que os resultados de uma ferramenta constituem os dados de entrada para a seguinte até chegar ao resultado final pretendido, sendo a informação de partida fornecida pelo utilizador. As novas ferramentas assim criadas foram então exportadas pelo ArcMap para *scripts* em linguagem *python*, i.e., ficheiros que contém a informação sobre o funcionamento das ferramentas de forma codificada. Por forma a automatizar as operações de geoprocessamento, foram programados comandos (botões) para a barra de ferramentas do sistema SIMDualKc-SIG que invocam interfaces gráficas para recolher junto do utilizador os *layers* geográficos e outro tipo de dados necessários ao geoprocessamento, fornecendo depois programaticamente esta informação juntamente com os scripts de *python* ao objecto ‘geoprocessador’ do ArcMap que se encarrega de executar as operações.

A criação da rede de estações meteorológicas virtuais e a posterior interpolação espacial dos dados meteorológicos das estações reais para as estações virtuais encontra-se esquematizada na Fig. 7.3. Este processo é constituído por duas etapas. A primeira recorre às ferramentas *Create Fishnet* e *Clip Features* disponíveis no *ArcToolBox* para, respectivamente, criar a rede de estações meteorológicas virtuais e recortá-la ao perímetro do bloco de rega. A segunda fase recorre à ferramenta *Point Distance*, também do *ArcToolBox*, para criar uma tabela *.dbf* com as distâncias entre cada uma das estações virtuais e as estações reais que ‘caem’ dentro do raio especificado pelo utilizador, tendo sido desenvolvido código para primeiro ler aquela tabela e depois realizar a interpolação.

A atribuição a cada parcela do solo e da estação meteorológica virtual dominantes encontra-se esquematizada na Fig. 7.4, mostrando numa primeira fase a criação de uma *shapefile* com os polígonos de Thiessen para cada uma das estações virtuais, e depois as operações de

‘interseção’, ‘ordenação de registos’ e ‘dissolução de fronteiras’ entre as *shapefiles* com os polígonos de thiesen das estações meteorológicas, com os solos e com as parcelas. Esta sequencia de operações culmina na criação de uma *shapefile* e respectiva tabela de atributos associada, i.e., a ‘Tabela de Simulação’, que contém as identificações (IDs) das parcelas, da cultura cultivada em cada uma delas e do método de rega utilizado, e do solo e da estação meteorológica dominantes em cada parcela, cujas identificações já constavam nas *shapefiles* das parcelas, do solo e das estações meteorológicas virtuais (Fig. 7.2). Além disso, são criados programaticamente novos atributos, ainda não preenchidos, que permitem a criação de diferentes cenários de simulação, como sejam a opção de gestão da rega pretendida em cada parcela, a data de plantação/iniciação de novas folhas, e os valores iniciais da depleção da água na zona radicular e na camada evaporativa do solo. Também é automaticamente o atributo *FcIV_ID* (Tabela 7.2), que deve ser preenchido com a mesma designação utilizada para guardar os parâmetros VI_{min} e VI_{max} na BD não espacial (ver ponto 7.2.2), e o atributo ‘*FieldArea*’ cujos valores para cada parcela são calculados pelo próprio sistema, destinando-se ao cálculo do hidrograma da procura para a rega.

Shapefile com as estações meteorológicas reais

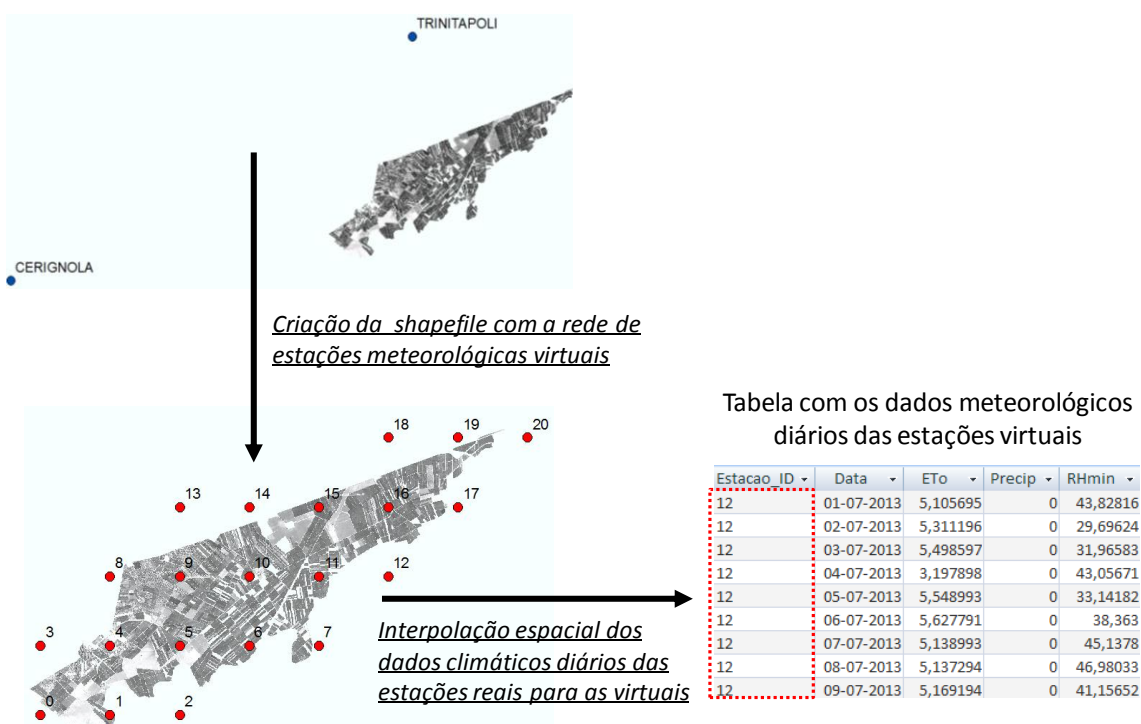


Fig. 7.3. Criação da rede de estações virtuais e interpolação espacial dos dados climáticos das estações reais para as estações virtuais.

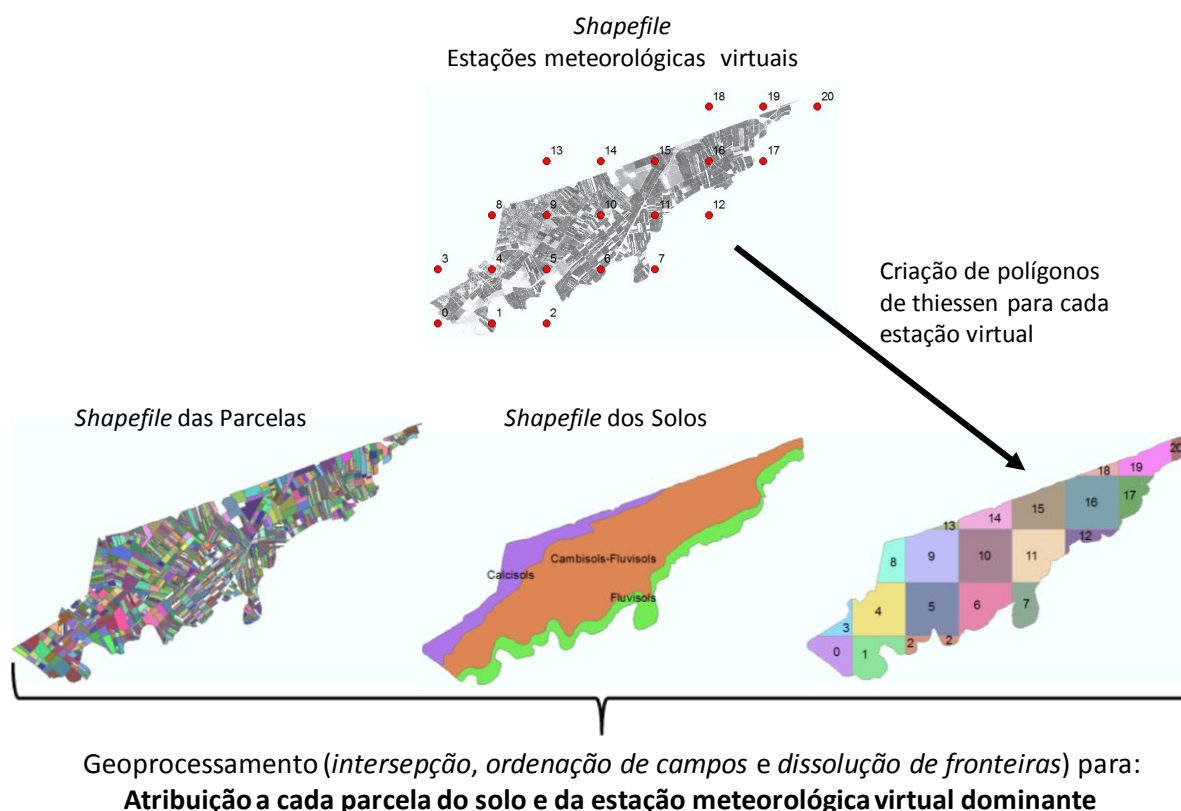


Fig. 7.4. Esquema da atribuição a cada parcela do solo e da estação meteorológica mais representativos.

Tabela 7.2. Descrição da Tabela de Simulação do sistema SIMDualKc-SIG

Códigos
Identificação da parcela (Field_ID)
Identificação da cultura (Crop_ID)
Identificação do solo dominante na parcela (Soil_ID)
Identificação da estação meteorológica virtual dominante na parcela (Station_ID)
Identificação do método de rega (IrrigSysID)
Identificação da opção de gestão da rega (IrrigManID)
Identificação dos dados para cálculo da f_c a partir dos IVs (FcIV_ID)
Dados adicionais para efectuar a simulação
Data da plantação/iniciação de novas folhas
Depleção inicial na zona radicular
Depleção inicial na camada evaporativa do solo
Área da parcela

7.2.4. Cálculo da f_c e do K_{cb} a partir de índices de vegetação obtidos por detecção remota

O sistema SIMDualKc-SIG ainda não contempla a automatização do cálculo da f_c a partir das imagens de satélite em ‘bruto’, sendo o cálculo dos índices de vegetação (IV) a partir de imagens de satélite (detecção remota) feita fora do sistema. A informação sobre os dados de detecção remota (satélite, datas de passagem, tratamento das imagens e cálculo dos IV) é

descrita no final da presente Secção. No sistema SIMDualKc-SIG a f_c é calculada como uma função linear dos IVs, seguindo Mateos et al. (2013), Gonzalez-Dugo et al. (2009) e Pôças et al. (2014):

$$f_c = \frac{VI_{act} - VI_{min}}{VI_{max} - VI_{min}} \quad (7.1)$$

Onde VI_{act} , VI_{min} e VI_{max} são, respectivamente, o valor actual, mínimo e máximo do IV

Obtidos desta forma os valores da f_c , os valores de K_{cb} são calculados segundo a abordagem proposta por Allen e Pereira (2009), que envolve para além da f_c a altura da cultura (secção 3.2.2 do Capítulo 3).

O cálculo da f_c a partir dos IVs contempla os seguintes passos:

- 1) Introdução na BD não espacial do sistema, dos parâmetros da Eq. 7.1, i.e., VI_{min} e VI_{max} , para cada uma das culturas do projecto ou do bloco de rega (Tabela 7.1). Para além dos valores destes parâmetros, esta tabela guarda também as opções e os dados para o cálculo da f_c à data da plantação e na data final da estação de crescimento para cada cultura, uma vez que é impossível haver sempre uma imagem de satélite disponível naquelas datas donde se possa calcular um IV. Assim, por exemplo, ser for seleccionada a opção 2 para o cálculo da f_c à data de plantação/iniciação foliar ou a opção 3 para o cálculo de f_c no fim da estação de crescimento, ambos os valores são calculados como uma fracção da f_c durante a fase intermédia da estação de crescimento, especificada pelo utilizador. Pelo contrário pode atribuir-se ao primeiro e ao último dia da estação de crescimento o valor da f_c calculado, respectivamente, a partir do primeiro IV a seguir à data da plantação ou do último IV antes do fim da estação de crescimento. Esta informação deve ser guardada com uma determinada designação (ID) atribuída ao campo (ou atributo) Fc_{IV_ID} da tabela (Fig. 7.5);
- 2) Criação de uma tabela *.dbf* com as identificações das parcelas, e as datas e os valores médios dos IVs para as parcelas (Fig. 7.5), podendo contemplar todas as parcelas do projecto ou apenas parte delas (por exemplo, as de maiores dimensões);
- 3) Leitura sequencial de cada linha ou registo da Tabela de Simulação (correspondendo as linhas às parcelas) em tempo de execução do balanço hídrico do solo. A Tabela de Simulação possui um atributo Fc_{IV_ID} (ver Tabela 7.2), o qual deve ser preenchido com a designação (ID) empregada em 1) para guardar os parâmetros da Eq. 7.1

4) No caso de numa determinada linha da Tabela de Simulação o valor do atributo *Parcela_ID* constar na Tabela *.dbf* dos IVs (Fig. 7.5), o procedimento de cálculo ‘pega’ nos valores do IV para essa parcela em cada data e transforma-os em f_c através da Eq. 7.1, sendo os valores de VI_{\min} e VI_{\max} para a cultura da parcela acedidos através do relacionamento entre o atributo *FcIV_ID* da Tabela de Simulação e o atributo *Fc_IV_ID* da tabela da BD não espacial destinada a guardar aqueles valores, ambos os atributos devendo possuir a mesma designação (ID) (Fig. 7.5). Os valores da f_c assim calculados são então guardados na ‘tabela da cultura’ da BD não espacial para depois serem transformados em K_{cb} de acordo com o procedimento de Allen e Pereira (2009) e exposto no ponto 3.2.2 do Capítulo 3. Ao passar a leitura da Tabela de Simulação para a linha/parcela seguinte, e caso o novo valor do atributo *Parcela_ID* constar também na tabela *.dbf* dos IVs, os valores de f_c previamente guardados são apagados e o processo aqui descrito recomeça;

Tabela *.dbf* com as datas e os valores dos IV

Field ID	Date1	VI 1	Date2	VI 2	Date3	VI 3	Date4	VI 4	Date5	VI 5	Date6	VI 6	Date7	VI 7
172	01-01-2014	0,158267	15-02-2014	0,246077	19-03-2014	0,23373	06-05-2014	0,345732	22-05-2014	0,283664	07-06-2014	0,382652	23-06-2014	0,382652
227	01-01-2014	0,170767	15-02-2014	0,327921	19-03-2014	0,33685	06-05-2014	0,309801	22-05-2014	0,326358	07-06-2014	0,319974	23-06-2014	0,3811
234	01-01-2014	0,145498	15-02-2014	0,264037	19-03-2014	0,256586	06-05-2014	0,189547	22-05-2014	0,26955	07-06-2014	0,402944	23-06-2014	0,4443
261	01-01-2014	0,135056	15-02-2014	0,21693	19-03-2014	0,18659	06-05-2014	0,196216	22-05-2014	0,252675	07-06-2014	0,395033	23-06-2014	0,4471
266	01-01-2014	0,134559	15-02-2014	0,226498	19-03-2014	0,170951	06-05-2014	0,22135	22-05-2014	0,292611	07-06-2014	0,383691	23-06-2014	0,4195
28	01-01-2014	0,130306	15-02-2014	0,186721	19-03-2014	0,135067	06-05-2014	0,194763	22-05-2014	0,278741	07-06-2014	0,430555	23-06-2014	0,4953
315	01-01-2014	0,185844	15-02-2014	0,210599	19-03-2014	0,242365	06-05-2014	0,241497	22-05-2014	0,195529	07-06-2014	0,191477	23-06-2014	0,2152
316	01-01-2014	0,182888	15-02-2014	0,197469	19-03-2014	0,257185	06-05-2014	0,173298	22-05-2014	0,161419	07-06-2014	0,184237	23-06-2014	0,256

Tabela de Simulação

Field ID	Fc_VI_ID	Crop ID	PlantDate	Station ID	Soil ID	Irrisys ID	Irriman ID	HumSoilini	HumSurfIni
241	Fc_VI_2014	Wine Grapes Harv 20-09	02-04-2014	10	Cambisols-Fluvisols	Drip Vines and Orchards	Wine Grapes Harv 20-09	0	0
257	Fc_VI_2014	Wine Grapes Harv 20-09	01-04-2014	10	Cambisols-Fluvisols	Drip Vines and Orchards	Wine Grapes Harv 20-09	0	0
261	Fc_VI_2014	Wine Grapes Harv 20-09	04-04-2014	5	Cambisols-Fluvisols	Drip Vines and Orchards	Wine Grapes Harv 20-09	0	0
266	Fc_VI_2014	Wine Grapes Harv 20-09	03-04-2014	5	Cambisols-Fluvisols	Drip Vines and Orchards	Wine Grapes Harv 20-09	0	0
271	Fc_VI_2014	Wine Grapes Harv 20-09	02-04-2014	10	Cambisols-Fluvisols	Drip Vines and Orchards	Wine Grapes Harv 20-09	0	0
272	Fc_VI_2014	Wine Grapes Harv 20-09	01-04-2014	10	Cambisols-Fluvisols	Drip Vines and Orchards	Wine Grapes Harv 20-09	0	0
274	Fc_VI_2014	Wine Grapes Harv 20-09	03-04-2014	10	Cambisols-Fluvisols	Drip Vines and Orchards	Wine Grapes Harv 20-09	0	0
275	Fc_VI_2014	Wine Grapes Harv 20-09	02-04-2014	10	Cambisols-Fluvisols	Drip Vines and Orchards	Wine Grapes Harv 20-09	0	0

Tabela na BD não espacial com os dados para o cálculo de f_c a partir dos IV

Fc_VI_ID	Crop_ID	VI_Max	VI_Min	Fc_ini_mode	Fc_end_mode	Fc_ini/Fc_mid	Fc_end/Fc_mid
Fc_VI_2014	Early Peach Harv 01-06	0,65	0,09	2	1	0,1	
Fc_VI_2014	Early Peach Harv 20-06	0,65	0,09	2	1	0,1	
Fc_VI_2014	Late Peach Harv 15-07	0,65	0,09	2	1	0,1	
Fc_VI_2014	Late Peach Harv 15-08	0,65	0,09	2	1	0,1	
Fc_VI_2014	Olives	0,55	0,09	1	1		
Fc_VI_2014	Table Grapes Harv 01-09	0,65	0,09	2	1	0,1	
Fc_VI_2014	Table Grapes Harv 10-09	0,65	0,09	2	1	0,1	
Fc_VI_2014	Table Grapes Harv 20-09	0,65	0,09	2	1	0,1	

Cálculo da f_c a partir dos valores de IV na data i e de VI_{\min} e VI_{\max}

$$f_{c,i} = \frac{VI_{date\ i} - VI_{\min}}{VI_{\max} - VI_{\min}} \quad \text{Se } VI_{date\ i} \geq VI_{\min}$$

$$f_{c,i} = 0 \quad \text{Se } VI_{date\ i} < VI_{\min}$$

Fig. 7.5. Esquema do cálculo da f_c a partir dos valores actuais dos índices de vegetação (IV) guardados numa tabela *.dbf* e dos valores mínimos e máximos do IV para uma certa cultura.

Obtenção e tratamento dos dados de satélite e cálculo dos IV

As imagens de satélite utilizadas neste estudo para cálculo dos IV são provenientes do sensor OLI (*Operational Land Imager*) a bordo do satélite Landsat 8, apresentando um nível de processamento L1T e tendo sido descarregadas no *website* <https://earthexplorer.usgs.gov/> do serviço geológico dos Estados Unidos da América (USGS). Mais concretamente foram utilizadas imagens nas bandas espectrais do vermelho (VR) ($0.636 < \lambda < 0.673$) e infravermelho próximo (NIR) ($0.851 < \lambda < 0.879$), já que são as reflectâncias nestas bandas as utilizadas no cálculo do índice SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*), utilizado neste estudo. As imagens gravadas pelo sensor OLI apresentam uma resolução espacial de 30 m para as bandas da região visível e do infravermelho não térmico e uma resolução temporal de 16 dias. No entanto como a área de estudo fica totalmente contida em duas cenas adjacentes do satélite Landsat 8, correspondentes às órbitas 188 e 189, a resolução temporal aumentou para 7 ou 9 dias. Foram escolhidas apenas as imagens com ausência de nuvens sobre a área de estudo, dispõe-se assim das seguintes imagens:

2013: 19-05, 20-06, 06-07, 13-07, 29-07, 07-08, 14-08, 23-08, 08-09, 24-09, 26-10, 02-11, 04-12, 20-12

2014: 15-02, 19-03, 06-05, 22-05, 07-06, 23-06, 09-07, 16-07, 10-08, 26-08, 13-10, 20-10, 05-11, 21-11, 23-12

O IV SAVI foi o adoptado neste estudo, em detrimento do NDVI, porque minimiza o efeito de humedecimento do solo nos valores do índice e porque provou nalguns estudos ser um melhor estimador da f_c do que o NDVI em cobertos lenhosos descontínuos (Poças et al., 2014), caso da maioria das culturas da área de estudo. O SAVI é calculado pela seguinte equação:

$$SAVI = \frac{\rho_{s\text{ NIR}} - \rho_{s\text{ VR}}}{\rho_{s\text{ NIR}} + \rho_{s\text{ VR}} + L} (1 + L) \quad (7.2)$$

onde $\rho_{s\text{ NIR}}$ é a reflectância de superfície na banda do infravermelho próximo, $\rho_{s\text{ VR}}$ é a reflectância de superfície na banda do vermelho e L é um factor de ajustamento do sinal do solo geralmente considerado igual a 0.5.

Uma vez que nas imagens multiespectrais de nível L1T, os valores da radiância se encontram ‘codificados’ numa escala de números inteiros digitais (DN) de 16-bit, variando 0-65535, é necessário converter estes DN em reflectância (ρ) antes de calcular o SAVI através da Eq. 7.2. Para isso utilizam-se os coeficientes de escala multiplicativo (a_{mult}) e aditivo (b_{add}), e o ângulo

zenital solar (θ_z), disponibilizados nos metadados associados às imagens (o ficheiro ‘MTL’), na seguinte equação:

$$\rho_{TOA\ band\ i} = \frac{a_{mult}\ DN + b_{add}}{\cos(\theta_z)} \quad (7.3)$$

onde $\rho_{TOA\ band\ i}$ é a reflectância espectral na banda i no topo da atmosfera (TOA).

Os valores obtidos com a Eq. 7.3 contemplam para além da radiância proveniente da superfície a radiância originada por difusão atmosférica (causada essencialmente por aerossóis), havendo que retirar das imagens o ‘ruído’ introduzido por esta última. Este procedimento, designado comumente por ‘correção atmosférica’, foi aqui conduzido com base no método *Dark Object Subtraction* (DOS) (Chavez, 1988), que assenta no pressuposto de que existem na imagem alvos escuros que deveriam apresentar valores de $\rho_{TOA\ band\ i}$ próximos de zero (como por exemplo, superfícies sombreadas, lagos e o mar), de tal forma que o sinal proveniente destes alvos e captado pelo sensor se deva apenas à difusão atmosférica da radiação solar (ρ_{haze}). Assim, o método DOS de correção atmosférica resume-se a deduzir aos valores de $\rho_{TOA\ band\ i}$ dos pixéis da imagem o valor de ρ_{haze} da respectiva banda espectral ($\rho_{haze\ i}$). No método DOS clássico os valores de $\rho_{haze\ i}$ são calculados de forma independente a partir dos respectivos histogramas de frequências absolutas dos DN, seleccionado-se para cada banda o valor mínimo válido de DN (*Lowest Valid Value*) (Chavez et al., 1988; GIS Ag Maps, 2017) e convertendo-o em $\rho_{haze\ i}$ através da Eq. 7.3

O método aqui utilizado difere do método DOS clássico na medida em que o procedimento *Lowest Valid Value* é utilizado apenas para calcular ρ_{haze} para a banda do VR ($\rho_{haze\ VR}$), sendo os valores de ρ_{haze} para as outras bandas (da região visível e do NIR) calculados em função de $\rho_{haze\ VR}$ com base numa ‘tabela de difusão espectral relativa’. Estas tabelas, primeiramente sugeridas e desenvolvidas por Chavez (1988), e continuamente actualizadas e aperfeiçoadas, por exemplo, pela equipa responsável pelo *website GIS Ag Maps* (2017), baseiam-se na relação de proporcionalidade inversa entre a contribuição relativa de cada banda para a ρ_{haze} total e λ_i^n , com λ_i o comprimento de onda central da banda i e n variando 0.5-4.0 consoante o grau concentração de aerossóis (Chavez, 1988). Assim, é possível, por exemplo, inferir do valor de $\rho_{haze\ VR}$ (calculado como explicado acima) o grau de concentração de aerossóis e daí seleccionar um grau n adequado em λ_i^n , a partir do qual são calculados os valores de ρ_{haze} para as outras bandas. Com base nestes princípios e relacionamentos, a equipa responsável pelo *website GIS Ag Maps* (<http://www.gisagmaps.com/>) desenvolveu uma calculadora a operar

directamente no seu *website* site, que com base nos valores de $\rho_{\text{haze VR}}$ introduzidos calcula os valores de ρ_{haze} para as restantes bandas do visível e do NIR.

Os passos seguidos para proceder à correcção atmosférica das imagens foram então:

- 1) Cálculo do valor de $\rho_{\text{haze VR}}$ de acordo com o procedimento *Lowest Valid Value*;
- 2) Utilização da ‘calculadora *GIS Ag Maps*’ para calcular o valor de $\rho_{\text{haze NIR}}$ a partir do valor de $\rho_{\text{haze VR}}$;
- 3) Conversão dos DN das imagens nas bandas do VR e NIR em, respectivamente, $\rho_{\text{TOA VR}}$ e $\rho_{\text{TOA NIR}}$ através da Eq. 7.3;
- 4) Dedução dos valores de $\rho_{\text{haze VR}}$ e $\rho_{\text{haze NIR}}$, respectivamente, aos valores de $\rho_{\text{TOA VR}}$ e $\rho_{\text{TOA NIR}}$, obtendo-se assim imagens de $\rho_s \text{ VR}$ e $\rho_s \text{ NIR}$;
- 5) Cálculo do SAVI através da Eq. 7.2, utilizando os valores de $\rho_s \text{ VR}$ e $\rho_s \text{ NIR}$ obtidos na alínea anterior.

7.2.5. Interface gráfica e operação do sistema

Em virtude de ter sido utilizada uma estratégia ‘acoplamento próximo’ do modelo SIMDualKc ao SIG e não de ‘acoplamento embutido’ em que os modelos de simulação são incorporados no SIG (Xu et al., 2015), não se pode falar de uma interface gráfica do sistema SIMDualKc-SIG. Trata-se sim, como referido em 7.2.1, de uma barra de ferramentas com uma série de botões que invocam as várias interfaces gráficas guardados na DLL associada à barra de ferramentas. Estas interfaces gráficas surgem então como janelas que se sobrepõem ao ArcMap (Fig. 7.6) e a partir das quais o utilizador opera o sistema, nomeadamente para:

- 1) Inserção nas respectivas tabelas da BD não espacial dos dados das culturas, do solo, do clima, dos sistemas de rega e das opções de gestão da rega, tal como elencado na Tabela 7.1., guardando essa informação com as designações (IDs) empregadas nos temas da BD espacial, por forma a para garantir a conectividade entre as duas BDs (Fig. 7.2);
- 2) Inserção na respectiva tabela da BD não espacial dos parâmetros da função $f_c\text{-IV}$ (Eq. 7.1) e da restante informação descrita em 7.2.4;
- 3) Executar as operações de geoprocessamento para a criação da rede de estações meteorológicas virtuais e interpolação espacial dos dados meteorológicos das estações reais para as estações virtuais (Fig. 7.3).

- 4) Executar as operações de geoprocessamento para a atribuição a cada parcela do solo e da estação meteorológica virtual dominantes (Fig. 7.4), culminando na criação da Tabela de Simulação, já referida em 7.2.3.;
- 5) Leitura da Tabela de Simulação e da tabela *.dbf* com as datas e os valores médios do IV em cada parcela:
- Leitura sequencial de cada linha ou registo da Tabela de Simulação (correspondendo as linhas às parcelas), em cada uma lendo os IDs da cultura (*Crop_ID*), do solo (*Soil_ID*), da estação meteorológica virtual (*Station_ID*), do sistema de rega (*IrriSysID*), das opções de gestão da rega (*IrriManID*), dos parâmetros da função f_c -VI (*FcIV_ID*), a data da plantação (*PlantDate*), e a depleção inicial na zona radicular (*SoilHumIni*) e na camada evaporativa do solo (*SurfHumIni*);
 - Recolha nas tabelas da BD não espacial dos dados da cultura, solo, estação meteorológica virtual, sistema de rega e opções de gestão da rega que possuam o mesmo ID que consta na linha da Tabela de Simulação correntemente lida (Fig. 7.1);
 - Utilização da informação dos pontos anteriores e da descrita em 7.2.4 para calcular o balanço hídrico do solo e produzir estimativas para a ET_c , $ET_{c\ act}$, T_c , $T_{c\ act}$, E_s e necessidades de rega, cujos valores diários em cada parcela são guardados na respectiva ‘tabela de resultados diários’ da BD não espacial, culminando este processo na criação de uma *shapefile* com a respectiva tabela de atributos que contém os valores acumulados daquelas variáveis em cada parcela, i.e., a ‘Tabela de Resultados’ (Tabela 7.3).

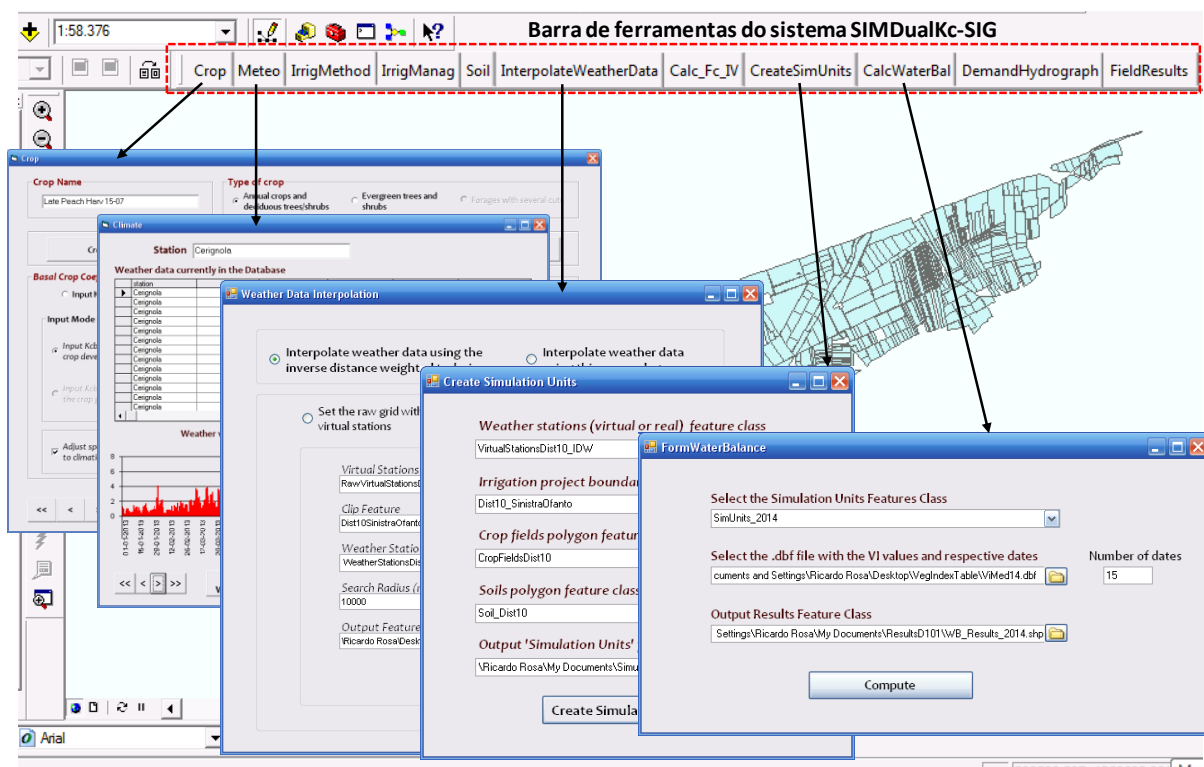


Fig. 7.6. Barra de ferramentas do sistema SIMDualKc-SIG e as interfaces gráficas.

7.2.6. Tipo de resultados

Os resultados do sistema SIMDualKc-SIG podem ser apresentados sob a forma de tabelas, gráficos ou mapas e podem dizer respeito a uma única parcela, a um conjunto de parcelas seleccionadas ou a todas as parcelas. Podem ainda referir-se a um determinado período especificado pelo utilizador, por exemplo, mapas das necessidades de rega semanais, ou à totalidade da estação de crescimento.

Os resultados acumulados das variáveis de interesse referentes à totalidade da estação de crescimento ou para períodos mais curtos especificados pelo utilizador são guardados e apresentados na Tabela de Resultados (Tabela 7.3).

Na Fig. 7.7 apresenta-se a Tabela de Resultados obtida pela aplicação do sistema SIMDualKc-SIG ao bloco de rega 10 do projecto de rega Sinistra-Ofanto em 2014 ao nível da duração total das estações de crescimento das várias culturas. Utilizando as capacidades de mapeamento do ArcMap qualquer dos resultados desta tabela pode mapeado, tal como efectuado inúmeras vezes no ponto 7.3.2.

Tabela 7.3. Resultados contidos na Tabela de Resultados

Códigos
Identificação da parcela (Field_ID)
Identificação da cultura (Crop_ID)
Resultados da simulação
Valores acumulados durante a estação de crescimento ou em períodos especificado pelo utilizador
Necessidades de rega a (mm)
Precipitação (mm)
Percolação profunda (mm)
Variação da água disponível no solo (ΔASW) (mm)
Evapotranspiração cultural potencial ($ET_{c\ pot}$) (mm)
Evapotranspiração cultural actual ($ET_{c\ act}$) (mm)
Transpiração potencial ($T_{c\ pot}$) (mm)
Transpiração actual ($T_{c\ act}$) (mm)
Evaporação do solo (E_s) (mm)
Rácios:
Razão $ET_{c\ act} / ET_{c\ pot}$
Razão $T_{c\ act} / T_{c\ pot}$
Razão $E_s / ET_{c\ act}$
Outros resultados
Perda relativa de produção (R_{YL}) (%)
Data do valor máximo diário da ET_c
Valor máximo diário da ET_c (mm)
Necessidades de rega para cada mês do ano (mm)

A barra de ferramentas do sistema SIMDualKc-SIG também possui um comando que invoca uma interface gráfica através da qual é possível seleccionar uma determinada parcela e visualizar os diferentes resultados nela calculados (Fig. 7.8).

O sistema SIMDualKc-SIG também permite calcular o hidrograma da procura para a rega relativo a um conjunto de parcelas seleccionadas, por exemplo, as que constituam um determinado sector de rega, ou para a totalidade do bloco ou do projecto de rega, tal como apresentado na Fig. 7.20 do ponto 7.3.2, aquando da aplicação do sistema ao bloco de rega 10 do projecto *Sinistra-Ofanto*.

FID	Shape	Field ID	Crop ID	Irrigation	Precipit	DeepPercol	ETmax	ETact	T max	T act	SoilEvap	ASW Var	RatETaET
186	Polygon	993	Table Grapes Harv 20-09	300	244,89445	0	694,28869	667,50262	570,74798	543,96228	123,540291	123,50293	0,961419
185	Polygon	992	Table Grapes Harv 20-09	300	244,89445	0	688,69189	658,89428	555,58599	525,788086	133,106171	114,747887	0,956733
270	Polygon	991	Wine Grapes Harv 10-09	250	244,60289	0	667,44970	617,40100	543,46148	493,412689	123,988304	123,631462	0,925015
184	Polygon	986	Table Grapes Harv 20-09	225	246,89878	0	613,57653	588,68176	457,82589	432,931	155,750626	117,453911	0,959427
79	Polygon	983	Late Peach Harv 15-08	325	291,62652	1,833645	773,50592	730,19207	648,65081	605,337097	124,855156	116,824562	0,944003
183	Polygon	978	Table Grapes Harv 20-09	300	244,89445	0	702,83715	668,88336	581,64965	547,696228	121,187767	125,048302	0,95169
330	Polygon	977	Wine Grapes Harv 20-09	250	246,89878	0	675,52948	628,64495	539,81829	492,933929	135,71106	132,971359	0,930596
329	Polygon	975	Wine Grapes Harv 20-09	225	247,02087	0	664,63958	611,46997	532,40570	479,336176	132,233734	140,714767	0,920002
269	Polygon	966	Wine Grapes Harv 10-09	225	246,64875	0	638,44250	592,96044	506,78808	461,306091	131,654434	122,058815	0,928761
328	Polygon	964	Wine Grapes Harv 20-09	250	246,89878	0	685,20404	632,02563	556,26147	503,082947	128,942657	136,29332	0,92239
327	Polygon	961	Wine Grapes Harv 20-09	250	248,12535	0	693,52392	637,76470	565,43396	509,675018	128,090073	140,93895	0,9196
268	Polygon	960	Wine Grapes Harv 10-09	250	244,60289	0	655,90637	607,04846	531,64721	482,78952	124,259216	113,046295	0,925511
216	Polygon	957	Tomato	165	133,13748	12,435243	360,67907	346,44232	247,06962	232,83284	113,609467	61,491718	0,960528
326	Polygon	95	Wine Grapes Harv 20-09	250	243,13607	0	670,20202	624,10168	540,68365	494,583282	129,518539	132,0811	0,931214
215	Polygon	949	Wine Grapes Harv 01-09	125	238,53949	0	501,53280	479,69247	368,07852	346,238068	133,454254	116,668091	0,956453
182	Polygon	948	Table Grapes Harv 20-09	275	243,13607	0	674,39160	643,89019	550,67877	520,177612	123,712608	126,754532	0,954772
214	Polygon	936	Wine Grapes Harv 01-09	225	238,66723	0	645,74255	588,28112	544,03015	486,569092	101,712151	125,592026	0,911015

Fig. 7.7. Exemplo da Tabela de Resultados resultante da aplicação do sistema SIMDualKc-SIG às principais culturas do bloco de rega 10 do projecto de rega Sinistra-Ofanto durante as respectivas estações de crescimento em 2014.



Fig. 7.8. Apresentação dos resultados diários para uma parcela bloco de rega seleccionada.

7.3. Aplicação do sistema ao bloco de rega 10 do projecto de rega *Sinistra-Ofanto*

7.3.1. Caracterização da área em estudo

A área de estudo (Fig. 7.9) localiza-se no nordeste da região da Apúlia, sudeste de Itália, correspondendo ao bloco de rega 10 do projecto de rega *Sinistra-Ofanto*, operado e gerido pelo *Consorzio per la Bonifica della Capitanata*, essencialmente uma associação de regantes administrada pelos agricultores proprietários das terras no consórcio. A área potencial de rega do bloco 10 é de 1679 hectares, embora Zaccaria et al. (2013) reporte que, daqueles, apenas 1423 hectares são efectivamente regados. Os métodos de rega utilizados são de micro-rega, essencialmente por gotejamento, micro-aspersão e nebulização.

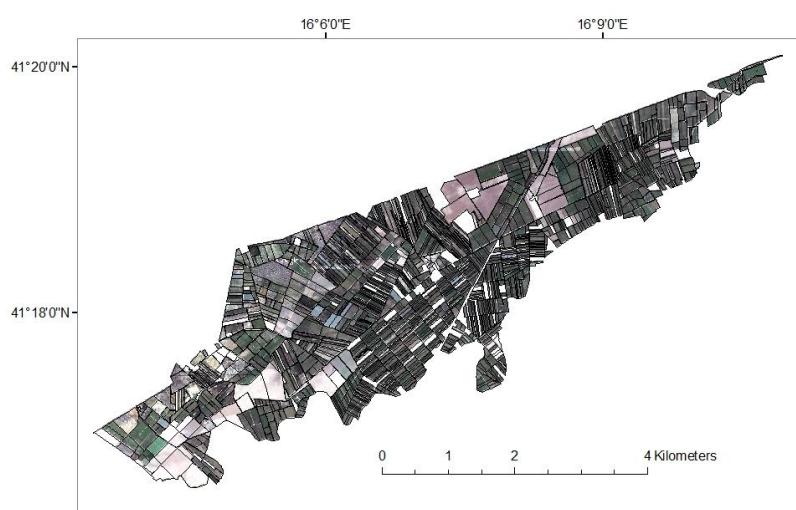


Fig. 7.9. Bloco de rega 10 do projecto de rega *Sinistra-Ofanto*

O Clima na região é classificado como semi-árido a sub-húmido, ou ‘mediterrânico marítimo’, com invernos moderadamente frios e chuvosos e verões quentes e secos (Zaccaria et al., 2013). Os dados meteorológicos diários de duas estações meteorológicas localizadas nas localidades de Cerignola (41° 15’ 54’’ N, 15° 54’ 05’’ O) e Trinitapoli (41° 21’ 30’’ N, 16° 05’ 18’’ O) (Fig. 7.13), respectivamente, a 12 e 8 Km do centro da área de estudo, foram disponibilizados pela equipa do CIHEAM-IAMB (Divisão de Solos e Recursos Hídricos do Instituto Agronómico Mediterrânico de Bari). Estes dados, referentes às temperaturas máxima e mínima (°C), humidade relativa máxima e mínima (%), radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), velocidade do vento (m s^{-1}) e precipitação (mm) foram utilizados neste estudo para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_0). Com os valores de ET_0 e da precipitação de cada uma das estações, calculou-se a média ponderada de ambas as variáveis para o bloco de rega 10, cujos pesos foram as distâncias das estações ao centro do bloco de rega 10. A evolução

temporal da ET_o e da precipitação assim calculadas para o bloco de rega 10 ao longo dos anos analisados de 2013 e 2014 apresenta-se na Fig. 7.10.

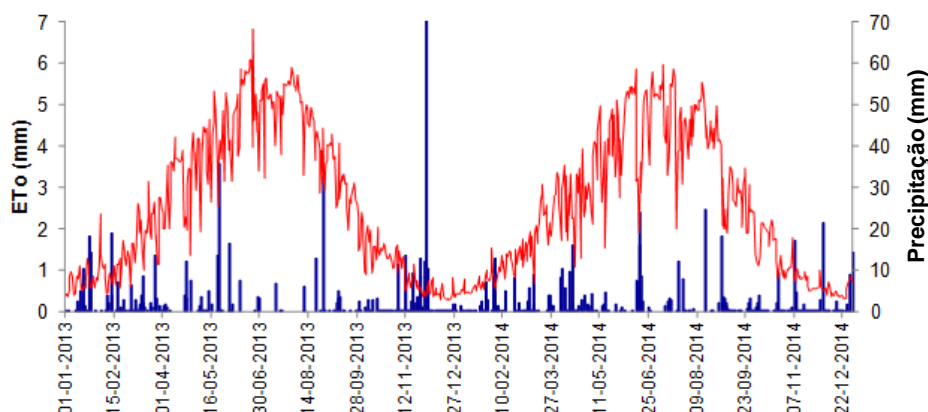


Fig. 7.10. Evapotranspiração de referência (ET_o) e precipitação diária no bloco de rega 10 no período 2013-2014.

O relevo da área é essencialmente plano e os solos predominantes no bloco de rega 10 são, de acordo com a classificação adoptada pela FAO, Cambissolos moderadamente profundos e de textura franca. Depois, com menor área aparecem os Fluvissolos de textura franca e moderadamente profundos, e os Calcissolos franco-arenosos pouco profundos (Fig. 7.11). A profundidade e a máxima disponibilidade de água de cada um destes solos apresenta-se na Tabela 7.4, tendo sido estes dados fornecidos pelo CIHEAM-IAMB (Divisão de Solos e Recursos Hídricos do Instituto Agronómico Mediterrânico de Bari), provenientes das prospecções aos solos agrícolas da Apúlia realizadas durante o projecto ACLA 2 (Steduto e Todorovic, 2001).

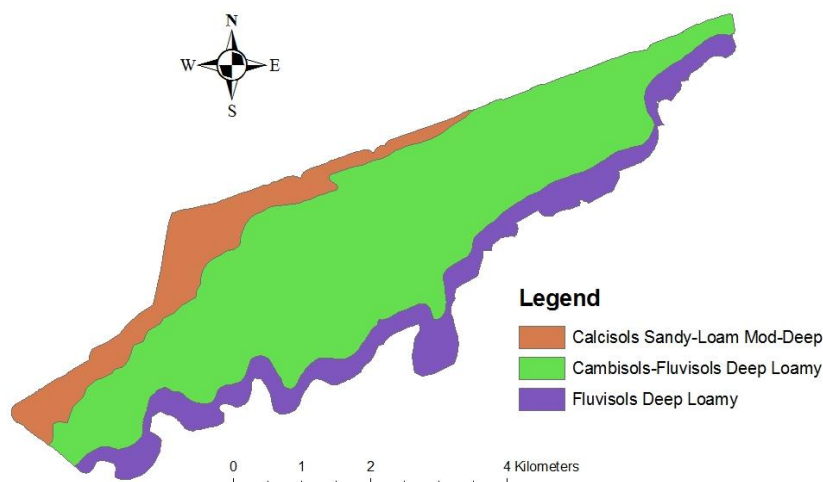


Fig. 7.11. Tipos dos solos (classificação FAO-Nações Unidas) na área do bloco de rega 10.

Tabela 7.4. Profundidade e máxima disponibilidade de água no solo (TAW) dos solos do bloco de rega 10¹.

Solo	Profundidade (m)	TAW (mm)
Cambissolos francos	1.8	261
Fluvisolos francos	2.0	298
Calcissolos franco-arenosos	0.9	108

¹ fonte: CIHEAM-IAMB, Divisão de Solos e Recursos Hídricos do Instituto Agronómico Mediterrânico de Bari.

As principais culturas regadas no bloco de rega 10 são, por ordem de representatividade, a vinha (para vinho e para uva de mesa), o pessegueiro (variedades precoces e tardias), o olival, a alcachofra e o tomate (Fig. 7.12). A principal cultura de sequeiro é o trigo. As datas de plantação/iniciação foliar e a duração dos estádios de desenvolvimento ‘padrão’ (Allen et al., 1998) das culturas apresentam-se na Tabela 7.5. Atente-se que para a vinha consideraram-se, para as simulações com o SIMDualKc, três datas de colheita (vindima), tanto para as variedades de uva para vinho como para as de mesa (informação fornecida pelo CIHEAM-IAMB), pelo que as durações do estágio de desenvolvimento intermédio (*mid-season*) apresentadas na Tabela 7.5 dizem respeito apenas aos casos em que a vindima é realizada a 10-09, variando a duração desta fase se uma outra data de colheita for considerada. Para o pessegueiro, consideraram-se duas datas de colheita, tanto para variedades precoces como tardias. No entanto, como independentemente da data de colheita se assumiu como fim da estação de crescimento o início das primeiras chuvas em Setembro (uma vez que a rega prossegue para além da colheita), não é necessário ajustar a duração da *mid-season*. A duração da fase inicial para as culturas da vinha e do pessegueiro foi retirada de Allen et al. (1998), enquanto que a duração da fase de desenvolvimento rápido foi estimada por análise da evolução temporal do SAVI nas parcelas cultivadas com aquelas culturas. Também por análise deste IV se constatou que a *mid-season* de ambas as culturas se estendeu desde o fim da fase de crescimento rápido até praticamente o final da estação de crescimento, uma vez que os valores do SAVI no princípio/meados de Setembro, i.e., no fim das estações de crescimento de ambas as culturas, permaneceu praticamente inalterado face aos valores de Julho e Agosto, não evidenciando portanto a existência de uma fase final senescente (*late-season*) marcada. No entanto, como o SIMDualKc exige a explicitação da duração da *late-season*, atribuiu-se arbitrariamente a esta um valor baixo, de 20 dias, para ambas as culturas. Como se pode constatar na Tabela 7.5, foi também considerada para estas culturas, uma gama de variação para as datas de iniciação das folhas, tal como acontece na realidade. Quanto à oliveira, ao invés de considerar a estação de crescimento como começando no início do crescimento

vegetativo primaveril, em meados de março, e prolongando-se até à colheita em Novembro (como por exemplo em Allen et al., 1998), optou-se por extendê-la à totalidade do ano civil, iniciando-se no dia 01-01, i.e., no pico do período de repouso vegetativo invernal prévio ao crescimento primaveril, e terminando no dia 31-12, i.e., no pico do período de repouso vegetativo invernal seguinte (após a colheita). A duração das fases de desenvolvimento da oliveira, adaptada à estação de crescimento tal como definida atrás, foi estimada compilando informação em Villalobos et al. (2000) e Orgaz et al. (2006). Note-se ainda, que não foram especificadas as datas de plantação nem a duração das fases de crescimento para a cultura da alcachofra, uma vez que estas são altamente variáveis, dependem das variedades utilizadas serem plurianuais ou anuais, e, nas plurianuais, a duração das fases é dependente da data do corte de rejuvenescimento e do redespertar da cultura (essencialmente através da rega). Assim, neste caso, as parcelas cultivadas com alcachofra foram analisadas uma a uma quanto à evolução temporal do SAVI, o que permitiu estimar as datas aproximadas da plantação, do corte de rejuvenescimento e da data do ‘redespertar’ da cultura e da colheita. Também na cultura do tomate, a gama de variação para as datas de sementeira apresentada na Tabela 7.5, foi estimada a partir do SAVI, assim como a duração das fases de desenvolvimento.

Faz-se notar que, no caso de não se fazer uso da detecção remota para cálculo dos K_{cb} (como aconteceu nas parcelas com área inferior a 1.45 ha), a duração das fases é utilizada para a construção da curva do K_{cb} (ver Capítulo 3); contrariamente, no caso da detecção remota ser utilizada, a curva do K_{cb} é construída com base nos valores e respectivas datas dos índices de vegetação (IV), calculando-se um valor de K_{cb} para cada uma dessas datas e depois construindo a curva. A duração das fases é no entanto comumente utilizada para a simular a profundidade radicular, a altura da cultura e a fracção p ao longo do ciclo cultural.

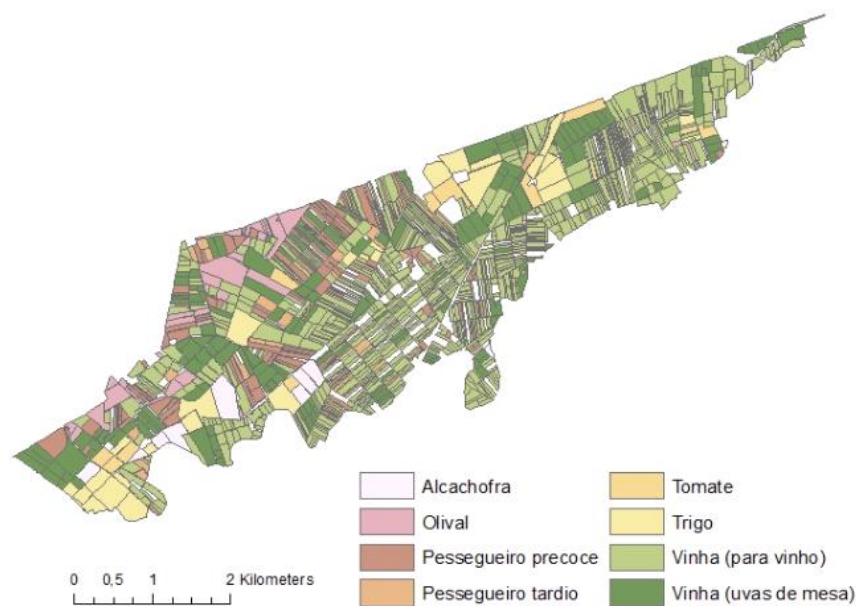


Fig. 7.12. Ocupação cultural do bloco de rega 10.

Tabela 7.5. Datas de plantação ou de iniciação das folhas e duração (dias) dos estádios de desenvolvimento para as culturas do bloco de rega 10.

	Data plantação ou iniciação foliar	Dur ini	Dur dev	Dur mid	Dur late
Tomate	20-04 a 01-06	15	35	30	20
Alcachofra	-	-	-	-	-
Olival	01-01	80	70	155	60
Vinha (uva vinho) – Harv 10-09 ¹	01-04 a 06-04	30	65	65	20
Vinha (uva mesa) – Harv 10-09 ¹	01-04 a 06-04	30	65	65	20
Pessegueiro precoce Harv 20-06 ¹	05-02 a 20-02	35	95	80	20
Pessegueiro tardio Harv 15-07 ¹	01-03 a 15-03	35	95	80	20

1: estas são apenas uma das datas de colheita consideradas; assim, na vinha, tanto para vinho como para uva de mesa, consideraram-se adicionalmente as datas de 01-09 e 20-09; no caso das variedades precoces de pessegueiro considerou-se também a data de 05-06, e nas variedade tardias de pessegueiro a data de 15-08. Nestes casos a duração da fase intermédia de desenvolvimento (*mid-season*) é diferente das apresentadas.

O cálculo do K_{cb} para todas as culturas foi feito seguindo a abordagem proposta por Allen e Pereira (2009), que está implementada no SIMDualKc (ponto 3.2.2 do Capítulo 3), i.e., especificando um valor de K_{cb} para hipotéticas condições de cobertura total do solo ($K_{cb \text{ full}}$) durante as fases inicial e média, e no fim do ciclo, e depois ajustando aqueles valores às condições actuais de densidade da cultura por via da fracção de cobertura do solo actual (f_c) e da altura da cultura (h), recorrendo ainda aos parâmetros M_L e $K_{c \text{ min}}$. Os valores de $K_{cb \text{ full}}$ para os estádios inicial e médio, e no fim do ciclo de desenvolvimento, os parâmetros M_L e $K_{c \text{ min}}$ de ajustamento à densidade e a fracção p para as culturas do bloco de rega 10 apresentam-se na Tabela 7.6, juntamente com os valores máximos da profundidade radicular ($Z_{r \text{ max}}$) e altura das culturas (h_{max}). Os valores de $K_{cb \text{ full}}$ para as culturas do olival, da vinha e

do pessegueiro foram calculados seguindo Allen e Pereira (2009), destacando-se os valores mais elevados aqui obtidos para a vinha, devido à sua elevada altura (2 m), aspecto associado ao sistema de condução praticado na zona, com um ‘tecto’ alto e aramado aos qual as ramadas das videiras se vão agarrando, formando um coberto relativamente homogéneo. Também os valores de $K_{cb \text{ full end}}$ para a vinha e para o pessegueiro aqui utilizados não seguem o decréscimo relatado em Allen et al. (2007b) e Allen e Pereira (2009) de $K_{cb \text{ full end}}$ relativamente a $K_{cb \text{ full mid}}$, uma vez que não é dada explicitamente por estes autores a razão daquele decréscimo e, mais importante, a que altura da *late-season* o valor de $K_{cb \text{ full end}}$ se refere (já com a senescência das folhas numa fase avançada ou não). Assim, como o fim da estação de crescimento da vinha foi aqui definido como coincidindo com a vindima e o do pessegueiro com o início das primeiras chuvas em Setembro, ambos referindo-se a alturas em que o coberto não evidenciou sinais claros de senescência (tal como já referido atrás), assumiu-se $K_{cb \text{ full end}} = K_{cb \text{ full mid}}$, baseando-se também esta decisão nos estudos de Ayars et al. (2003) e Abrisqueta et al. (2013) para o pessegueiro, Williams e Ayars (2005), e Netzer et al. (2009) em vinha, e Johnson et al. (2005) para ambas as culturas. Os valores de $K_{cb \text{ full}}$ para o trigo, tomate e alcachofra correspondem àqueles tabelados em Allen et al. (1998), para condições agronómicas e de rega óptimas, conducentes a uma cobertura total ou quase total do solo. No caso do tomate, contudo, também se assumiu $K_{cb \text{ full end}} = K_{cb \text{ full mid}}$, seguindo Hanson e May (2006), lembrando que estes valores se referem a condições potenciais e não actuais. Destaca-se ainda no caso da alcachofra a utilização de um valor de $K_{cb \text{ full}}$ para períodos de não crescimento ($K_{cb \text{ full off}}$), utilizado por exemplo por Zhao et al. (2013) e Zhang et al. (2013), num contexto completamente diferente, na Planície do Norte da China, para simular a transpiração do trigo de inverno durante o longo período de solo gelado, em que após uma fase inicial de rápido estabelecimento da cultura esta entra num estado de dormência durante aquele período. No entanto aqui, a utilização do $K_{cb \text{ full off}}$ constitui um artefacto para simular a transpiração (T_c) da alcachofra durante o período invernal até ao corte de primavera, sendo depois o valor de $K_{cb \text{ full ini}}$ utilizado para calcular T_c do período que vai desde o corte até ao despertar da cultura. Quanto aos valores de M_L , não têm influência no cálculo do K_{cb} para as culturas do trigo, do tomate e da alcachofra, uma vez que este parâmetro só é invocado para culturas altas (Allen e Pereira, 2009), razão pela qual se adoptou o valor intermédio (1.75) da gama de variação recomendada para este parâmetro. Para o olival adoptou-se igualmente $M_L = 1.75$, i.e., o ‘valor do meio’, por falta de estudos em que este parâmetro foi aplicado a esta cultura. Já no caso da vinha e do pessegueiro, adoptou-se $M_L = 1.5$, devido aos bons resultados obtidos para o pessegueiro por Paço et al. (2012) com este

valor, também utilizado com sucesso na presente tese de doutoramento (Capítulo 4) na estimação ET_c da cultura da pereira ‘Rocha’. Quanto ao valor de $K_{c\ min}$, foi de 0.15 para o trigo, devido ao frequente humedecimento do solo pela precipitação duramente o inverno e primavera, tendo sido adoptado igual valor para o tomate e para a alcachofra, mas agora por causa do frequente humedecimento do solo pela rega e a elevada fracção do solo humedecida. Contrariamente, para os pomares e para a vinha, considerou-se $K_{c\ min} = 0.075$, uma vez que apenas uma pequena fracção do solo é humedecida pela rega e a precipitação durante a maior parte da estação de crescimento das culturas é reduzida. Estes aspectos são discutidos com maior detalhe no Capítulo 3 e 4. Quanto à fracção p , assumiram-se os valores tabelados em Allen et al. (1998) para todas as culturas. Na Tabela 7.6 também se apresentam os valores de f_c para o período inicial e médio, e para o final da estação de crescimento, que foram utilizados para o cálculo do K_{cb} ajustado às condições actuais de densidade, na ausência de estimativas da f_c obtidas por detecção remota, ou seja, sempre que as parcelas onde as culturas estão instaladas tenham uma área inferior a 1.45 hectares.

Tabela 7.6. Coeficientes culturais em condições de cobertura total ($K_{cb\ full}$), parâmetros para o ajustamento destes às condições actuais de densidade (M_L e $K_{c\ min}$), fracção da depleção da água do solo sem stresse (p), profundidade radicular máxima ($Z_{r\ max}$), altura máxima (h_{max}) e fracção de cobertura (f_c) para as culturas do bloco de rega 10.

	Trigo	Tomate	Alcachofra	Olival	Vinha	Pessegueiro
$K_{cb\ full\ off}$	-	-	1.0	-	-	-
$K_{cb\ full\ ini}$	1.10	1.10	1.0	0.55	1.15	1.20
$K_{cb\ full\ mid}$	1.10	1.10	1.0	0.65	1.15	1.20
$K_{cb\ full\ end}$	1.10	1.10	1.0	0.6	1.15	1.20
M_L	1.75	1.75	1.75	1.75	1.5	1.5
$K_{c\ min}$	0.15	0.15	0.15	0.075	0.075	0.075
p	0.55	0.4	0.45	0.65	0.4	0.5
$Z_{r\ max}$	1.2	0.8	0.8	1.2	1.4	1.0
h_{max}	1	0.6	0.7	4	2	3
$f_{c\ ini}^1$	0.05	0.05	-	0.5	0.05	0.05
$f_{c\ mid}^1$	0.85	0.85	-	0.5	0.6	0.55
$f_{c\ end}^1$	0.10	0.80	-	0.5	0.55	0.5

1: estes valores são utilizados quando as culturas se encontram em parcelas com área < 1.45 ha, i.e., quando não se utiliza a f_c calculada a partir de IVs obtidos por detecção remota.

O método de rega considerado para todas as culturas foi o gotejamento, de entre os métodos de rega localizada o mais amplamente utilizado na zona, com dotações máximas de 15 mm para o tomate, 20 mm para a alcachofra e 25 mm para os pomares e vinha, de acordo com a informação prestada pelo CIHEAM. A fracção da superfície do solo humedecida (f_w) foi estimada em 0.4 para o tomate e a alcachofra, e $f_w = 0.15$ para os pomares e vinha.

Quanto à gestão da rega, simularam-se para todas as culturas, à excepção da oliveira, práticas de rega deficitária, tal como praticado na região. Assim, enquanto que para o tomate a simulação baseou-se simplesmente na especificação de um valor de $MAD = 35\%$ de $(1 - p)$ para a fase final (*late-season*) da estação de crescimento (ponto 3.3.3.1, Capítulo 3), para as culturas da alcachofra, da vinha e do pessegueiro utilizou-se o novo procedimento descrito em 7.2.2, apresentando-se na Tabela 7.7 os períodos ou estádios fenológicos considerados, a sua delimitação temporal e os respectivos valores de MAD. Para a cultura da alcachofra considerou-se rega sem stress, i.e., $MAD = 0\%(1 - p)$ à excepção do período que vai do corte até ao redespertar da cultura, em que se considerou $MAD = 100\%(1 - p)$, i.e., não se regou. Para a vinha de uva para vinho adoptou-se um stress mais severo na fase do pintor à vindima, com $MAD = 40\% (1 - p)$, do que para a vinha para uva de mesa em que $MAD = 25\% (1 - p)$ naquela fase. Quanto ao pessegueiro, tanto precoce como tardio, assumiu-se, seguindo a prática na região, um corte da rega de cerca de 50% após a colheita, aspecto que foi simulado adoptando nesse período $MAD = 50\% (1 - p)$.

Tabela 7.7. Especificação do MAD em diferentes períodos das estações de crescimento das culturas da alcachofra, vinha e pessegueiro.

Cultura	Período fenológico	Desde DAP	Até DAP	MAD $p + \%(1-p)$
Alcachofra CB 01-06 RG 01-08	do início do ano até ao corte	0	30	0
	do corte ao recrescimento	131	212	100
	do recrescimento ao fim ano	213	365	0
Vinha (uva vinho) – Harv 10-09	da iniciação foliar ao pintor	0	122	0
	do pintor à vindima	123	176	40
Vinha (uva mesa) – Harv 10-09	da iniciação foliar ao pintor	0	122	0
	do pintor à vindima	123	176	25
Pessegueiro precoce Harv 20-06	Até à colheita	0	126	0
	da colheita até Setembro	127	229	50
Pessegueiro tardio Harv 15-08	Até à colheita	0	151	0
	da colheita até Setembro	152	220	50

7.3.2. Resultados

Utilizando o interpolador espacial de dados climáticos do sistema SIMDualKc-SIG, foi criada uma rede de 20 estações meteorológicas virtuais recortadas ao bloco de rega 10 (Fig. 7.13) e para cada uma delas foram interpolados com base no método do inverso da distância (IDW) os valores diários de ET_o , precipitação, RH_{min} e u_2 das estações de Cerignola e Trinitapoli.

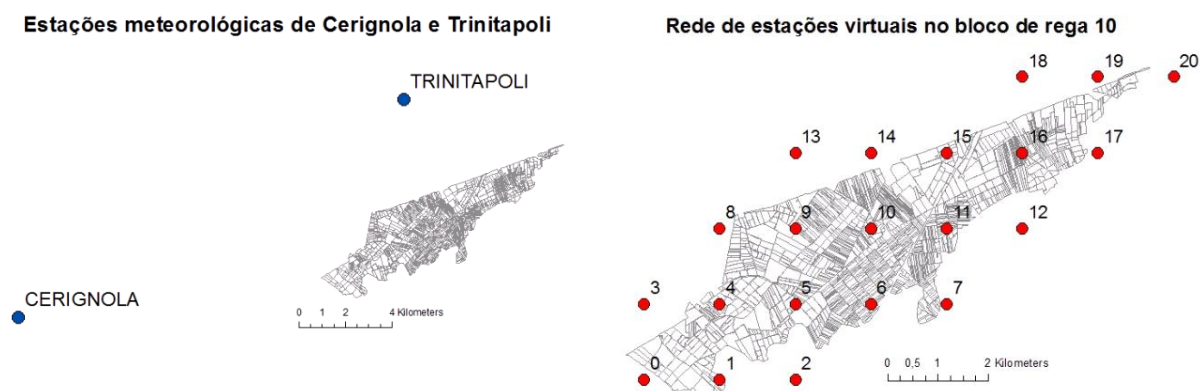


Fig. 7.13. Criação da rede de estações meteorológicas virtuais para o bloco de rega 10.

Tal como descrito em 7.2.3, a partir desta rede de estações meteorológicas virtuais são criados polígonos de thiesen e, mediante operações de geoprocessamento envolvendo os *layers* geográficos com os polígonos de thiesen e com as parcelas, atribui-se a cada parcela os dados climáticos da estação virtual cujo respectivo polígono de thiesen apresentou a maior área de influência na parcela. Com base nos dados anuais de ET_o e da precipitação em 2013 para cada estação virtual e polígono de thiesen associado, apresenta-se na Fig. 7.14 a distribuição espacial destas variáveis no bloco de rega 10. Nesta figura também se apresentam os valores acumulados da ET_c actual para uma hipotética vinha de uva para vinho, tendo-se procedido à divisão do bloco de rega em parcelas iguais de 4 ha e à consideração de um mesmo solo (Cambissolo franco moderadamente profundo, $TAW = 261$ mm). Pode constatar-se que existe um gradiente N-S e E-O da ET_o e da precipitação, com valores mais elevados destas variáveis quando se caminha de nordeste para sudoeste. A Fig. 7.14 também revela que, apesar das zonas com maior ET_o também apresentarem maior precipitação, a $ET_{c\ act}$ da vinha aumentou de NE para SO, já que o gradiente de ET_o é mais elevado do que o da precipitação. Ao nível das necessidades de rega este aspecto reflectiu-se apenas num aumento de 25 mm a partir do segundo terço do bloco de rega no sentido NE-SO.

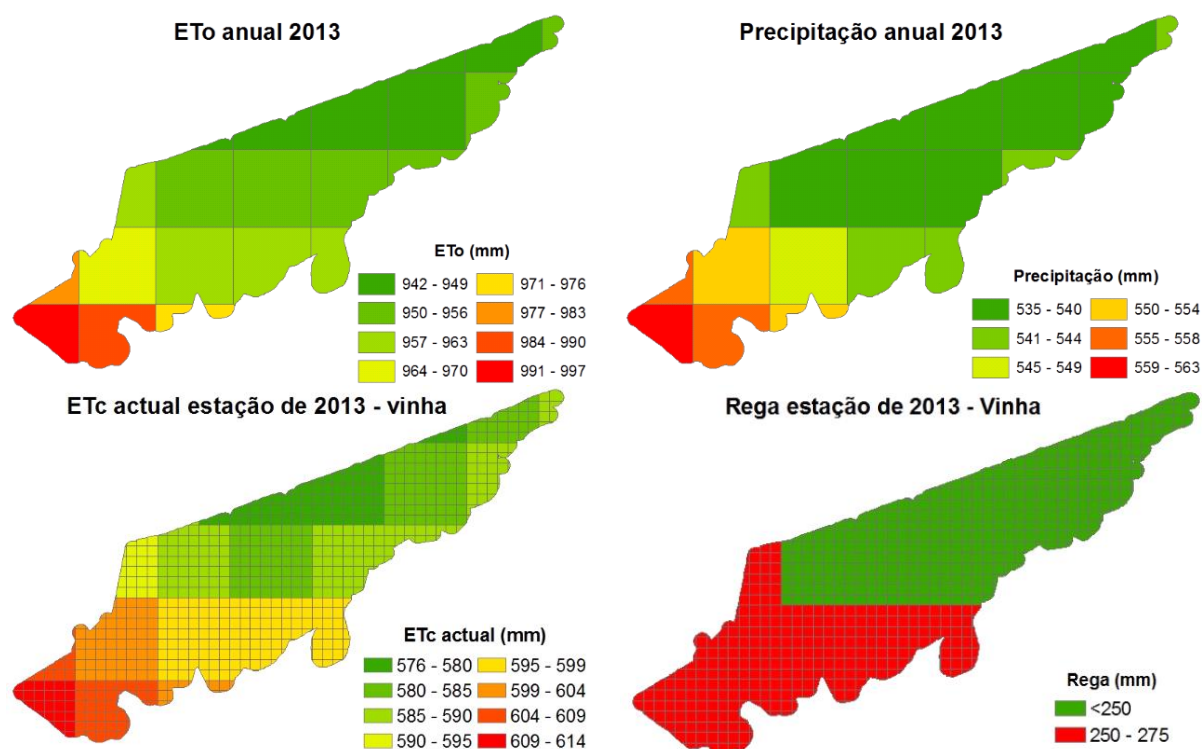


Fig. 7.14. Distribuição espacial dos valores anuais da ET_0 e da precipitação, e dos valores acumulados da $ET_{c \text{ actual}}$ e da rega para a cultura da vinha (para vinho).

Com o objectivo de avaliar a distribuição espacial da densidade das culturas e do próprio procedimento de estimação da f_c / K_{cb} a partir da detecção remota, apresentam-se na Fig. 7.15 a distribuição espacial do K_{cb} calculado com este procedimento para as culturas da oliveira, da vinha e do pessegueiro. Pode constatar-se que o K_{cb} apresenta uma variação espacial pronunciada para as três culturas e que as necessidades de rega acompanham o K_{cb} , i.e., são mais elevadas quando K_{cb} é elevado e mais baixas caso contrário. Este aspecto ilustra bem a utilidade da utilização da detecção remota em estudos das necessidades de rega e do procedimento implementado no sistema SIMDualKc-SIG.

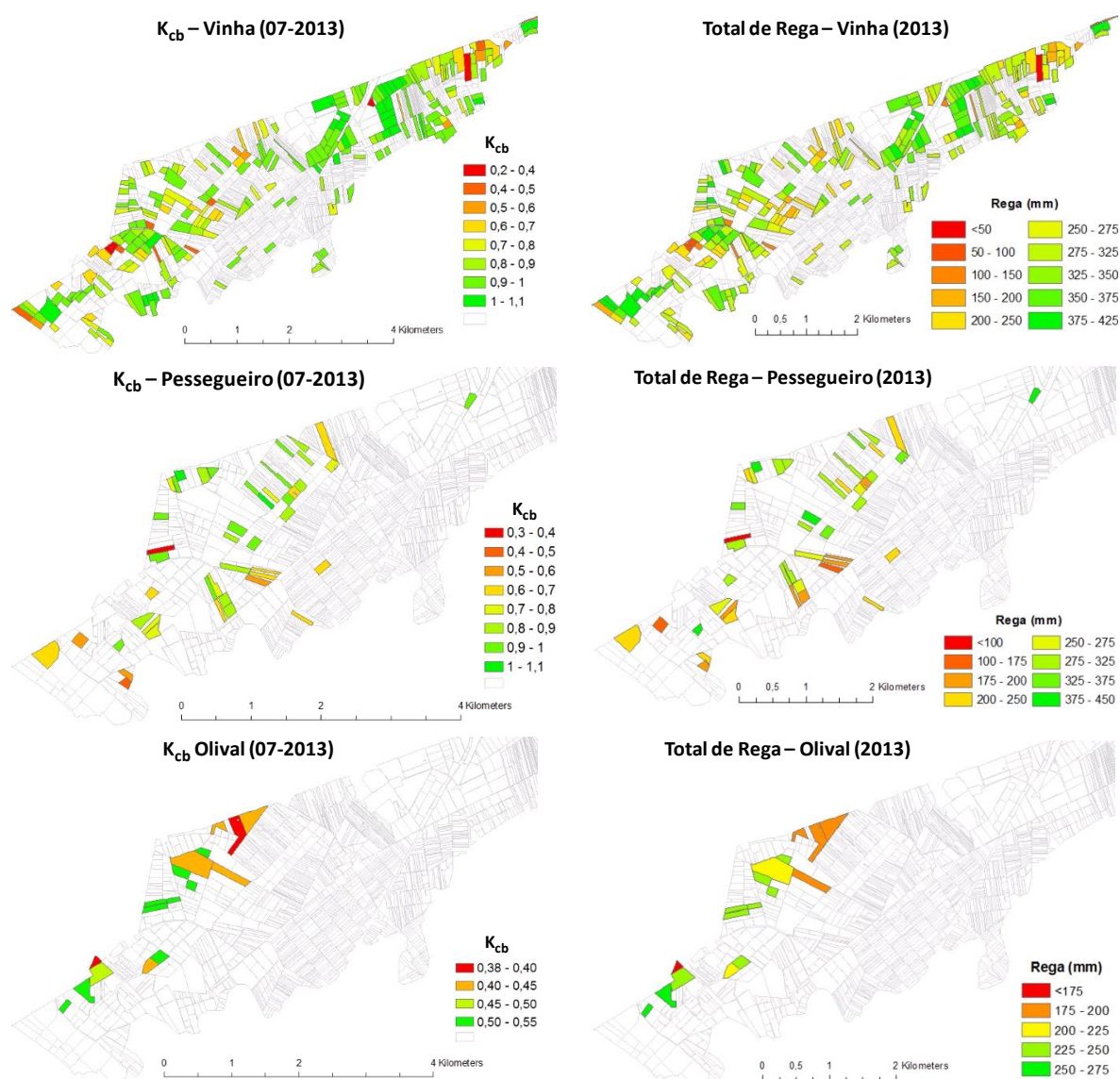


Fig. 7.15. Mapa com o valor médio K_{cb} em Julho de 2013 para a vinha, pessegueiro e olival.

Com o objectivo de analisar ‘mais de perto’ o desempenho do procedimento ‘ f_c - K_{cb} -VI’ e a influência dos valores de K_{cb} assim calculados nas necessidades de rega, apresentam-se na Fig. 7.16, a evolução temporal do K_{cb} , $K_{cb\ act}$, K_e , da precipitação e da rega para cada uma das culturas estudadas em duas condições de densidade, alta e moderada, e para o mesmo solo. Podem constatar-se bem as diferenças da curva do K_{cb} entre as duas condições de densidade para todas as culturas (menos pronunciada para o olival) e as diferenças ao nível no número de rega aplicadas: Na vinha com f_c elevada o sistema SIMDualKc-SIG simulou 17 regas contra 13 em condições de baixa f_c . No pessegueiro essas diferenças foram de 15 contra 10, no tomate de 17 contra 15, na alcachofra de 20 contra 16, enquanto que no olival não houve diferenças no número de regas, uma vez que as diferenças de f_c/K_{cb} foram pequenas entre os dois casos.

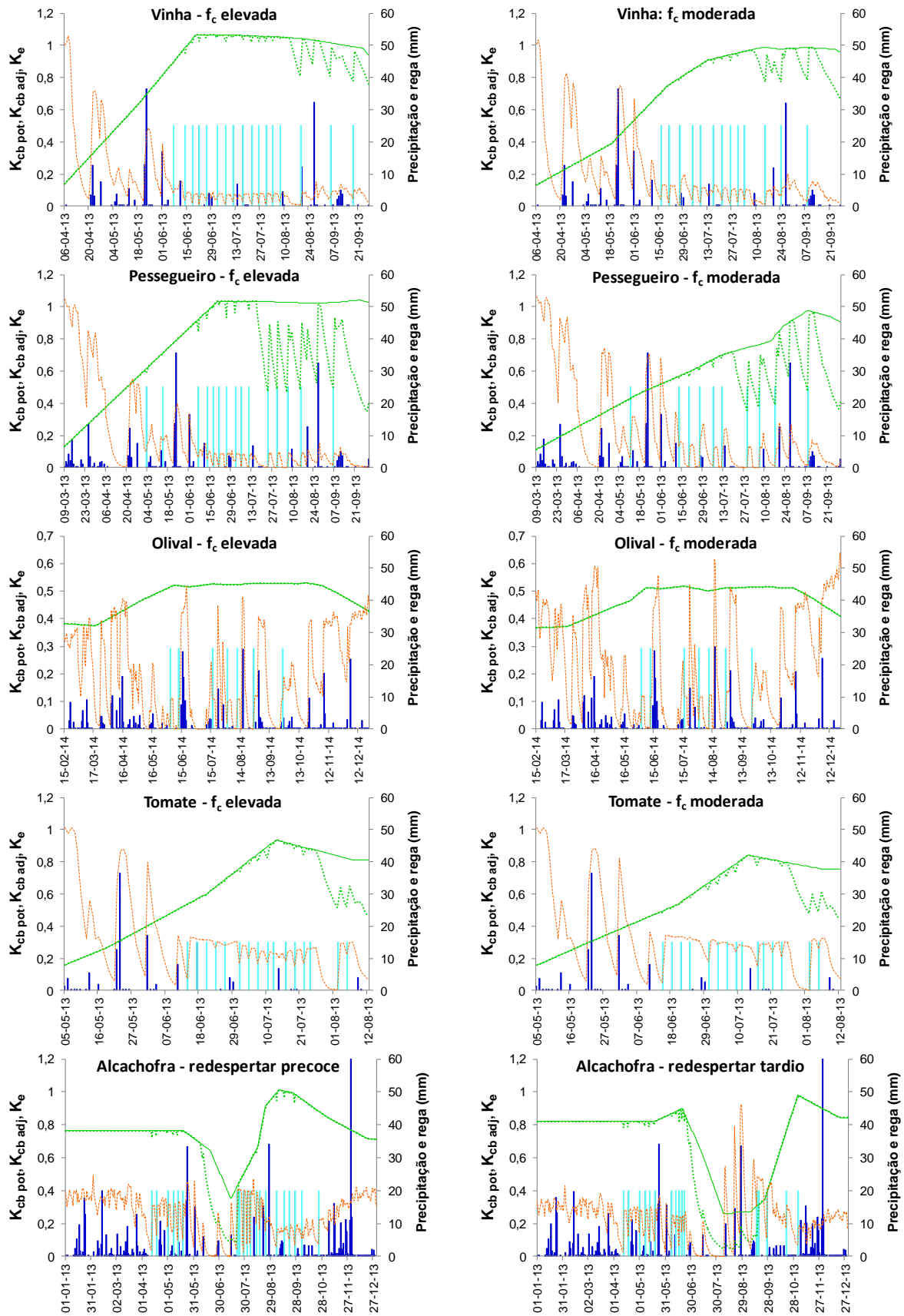


Fig. 7.16. Influência da fracção de cobertura do solo (f_c) obtida por detecção remota nas necessidades de rega das culturas da vinha, pessegueiro, olival, tomate e alcachofra. K_{cb} (—), $K_{cb\ act}$ (- - -), K_e (. . .), precipitação (—), e rega (—).

Procurou-se também fazer sobressair as vantagens do uso do sistema SIMDualKc-SIG ao nível da variação das necessidades de rega com o tipo de solo ou com o seu valor de TAW. Assim, procuraram-se parcelas com a mesma cultura e com densidade/ K_{cb} similares, sob as mesmas condições climáticas, mas cultivadas em solos diferentes, mais concretamente em Cambissolos franco-profundos ($TAW = 261$ mm) e em Calcissolos franco-arenosos pouco profundos ($TAW = 108$ mm). Os resultados apresentam-se na Fig. 7.17, para a vinha, pessegueiro e olival, constata-se que para a vinha cultivada no solo com elevada TAW o modelo simulou 13 regas contra as 15 determinadas para o solo com reduzida TAW. Para o pessegueiro essa diferença foi de 11 contra 12 e para o olival de 5 contra 7. Conclui-se pois que o tipo de solo contribui para diferenças ao nível das necessidades de rega embora tenha um papel menos preponderante do que o da f_c avaliado acima.

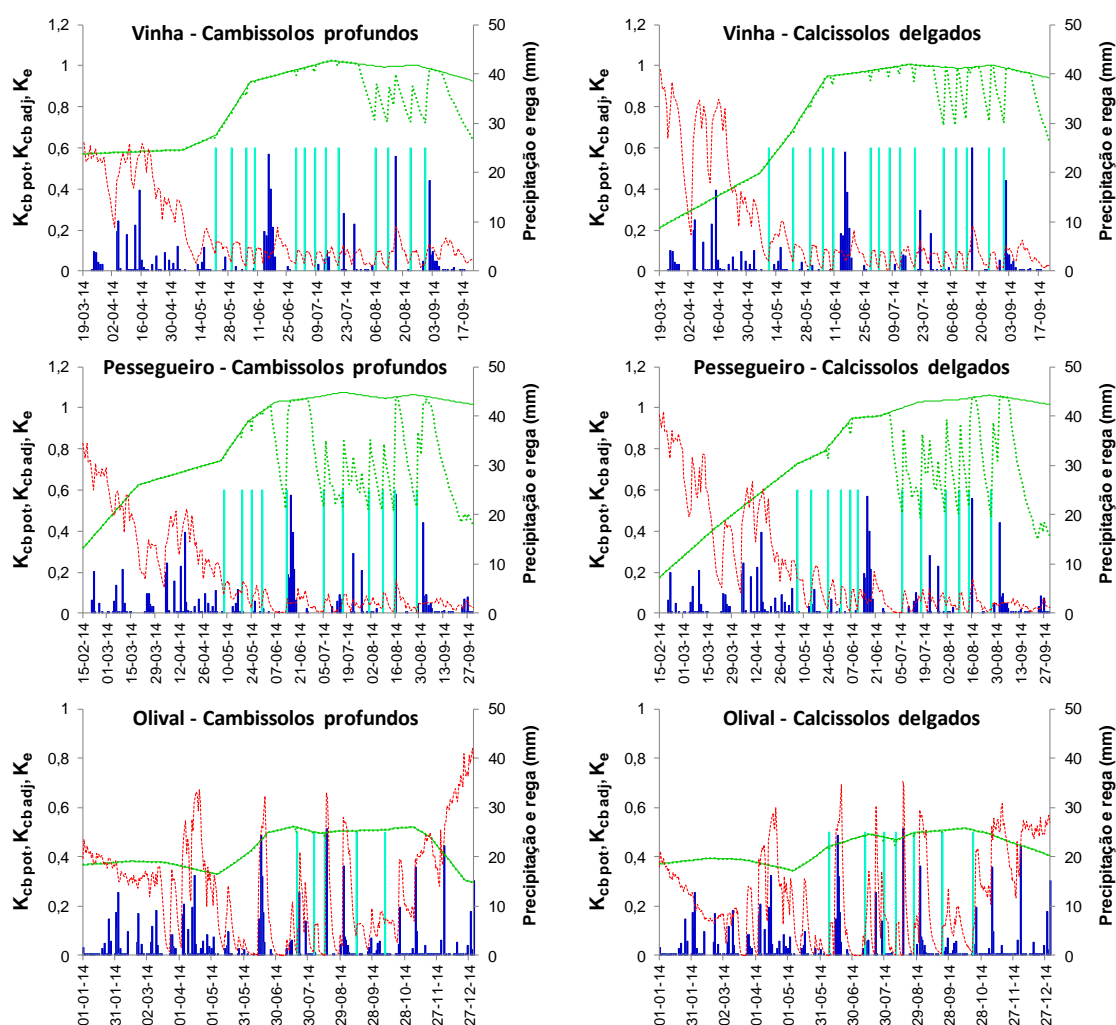


Fig. 7.17. Influência da capacidade de armazenamento do solo para a água nas necessidades de rega das culturas da vinha, pessegueiro e olival. K_{cb} (—), K_{cb} act (- - -), K_e (.....), precipitação (—), e rega (—).

Como o modelo SIMDualKc faz a partição da ET_c em transpiração da cultura (T_c) e evaporação do solo (E_s), testou-se o sistema SIMDualKc-SIG em capturar a variação espacial desta partição. Na Fig. 7.18 apresenta-se para a cultura da vinha (para vinho e para uva de mesa) a distribuição espacial dos valores de T_c e E_s acumulados durante a estação de crescimento de 2014. Pode observar-se que a E_s apresenta uma variação espacial inversa da T_c , com as cores verdes vivas indicativas da elevada T_c a corresponderem à cor laranja ou vermelha indicativa de baixos valores da E_s .

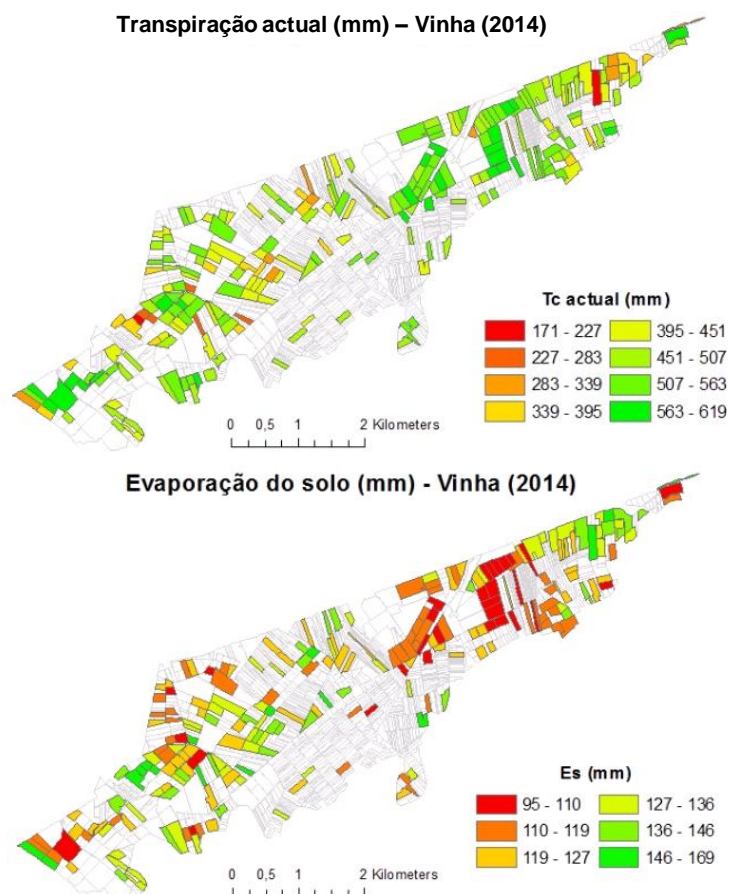


Fig. 7.18. Distribuição espacial da transpiração actual e da evaporação do solo para a cultura da vinha (para vinho) em 2014.

O sistema SIMDualKc-SIG foi também testado para detectar diferenças ao nível da T_c , da E_s e das necessidades de rega para todas as culturas entre as estações de crescimento de 2013 e de 2014. Estes resultados apresentam-se na Fig. 7.19, mostrando que não existem diferenças substanciais ao nível da T_c entre 2013 e 2014, se forem excluídas da análise as parcelas a vermelho destinadas ao cultivo de culturas anuais mas que não foram cultivadas nesses anos. No entanto se a informação da Fig. 7.19 for cruzada com a da Fig. 7.12 (ocupação cultural do bloco 10), pode notar-se que para as parcelas cultivadas com vinha a T_c foi maior em 2013 do

que em 2014, não se conseguindo detectar diferenças notórias para as outras culturas. Relativamente à E_s , também não é possível detectar pela figura um padrão claramente diferente de um ano para o outro (mais uma vez excluindo da análise as parcelas a vermelho), embora tal como para a T_c , nas parcelas cultivadas com vinha a E_s seja superior em 2014. Quanto às necessidades de rega, as diferenças são substanciais entre os dois anos, com todas as culturas em 2013 a apresentarem maiores necessidades de rega do que em 2014, aspecto que é particularmente evidente para a vinha. Estas diferenças devem-se a diferenças substanciais entre os dois anos ao nível da precipitação e da ET_o no período de Abril-Setembro, que coincide com a estação de crescimento da maioria das culturas do bloco de rega, com a precipitação bastante superior em 2014 (305 mm) do que em 2013 (225 mm), o contrário acontecendo com a ET_o , que em 2014 totalizou para aquele período 754 mm em 2014 e 816 mm em 2013. Este aspecto está bem patente nos hidrogramas da procura para a rega simulados pelo sistema SIMDualKc-SIG em 2013 e 2014 apresentados na Fig. 7.20, em que os volumes de água para rega ao nível do bloco 10 são muito mais elevados em 2013 do que em 2014.

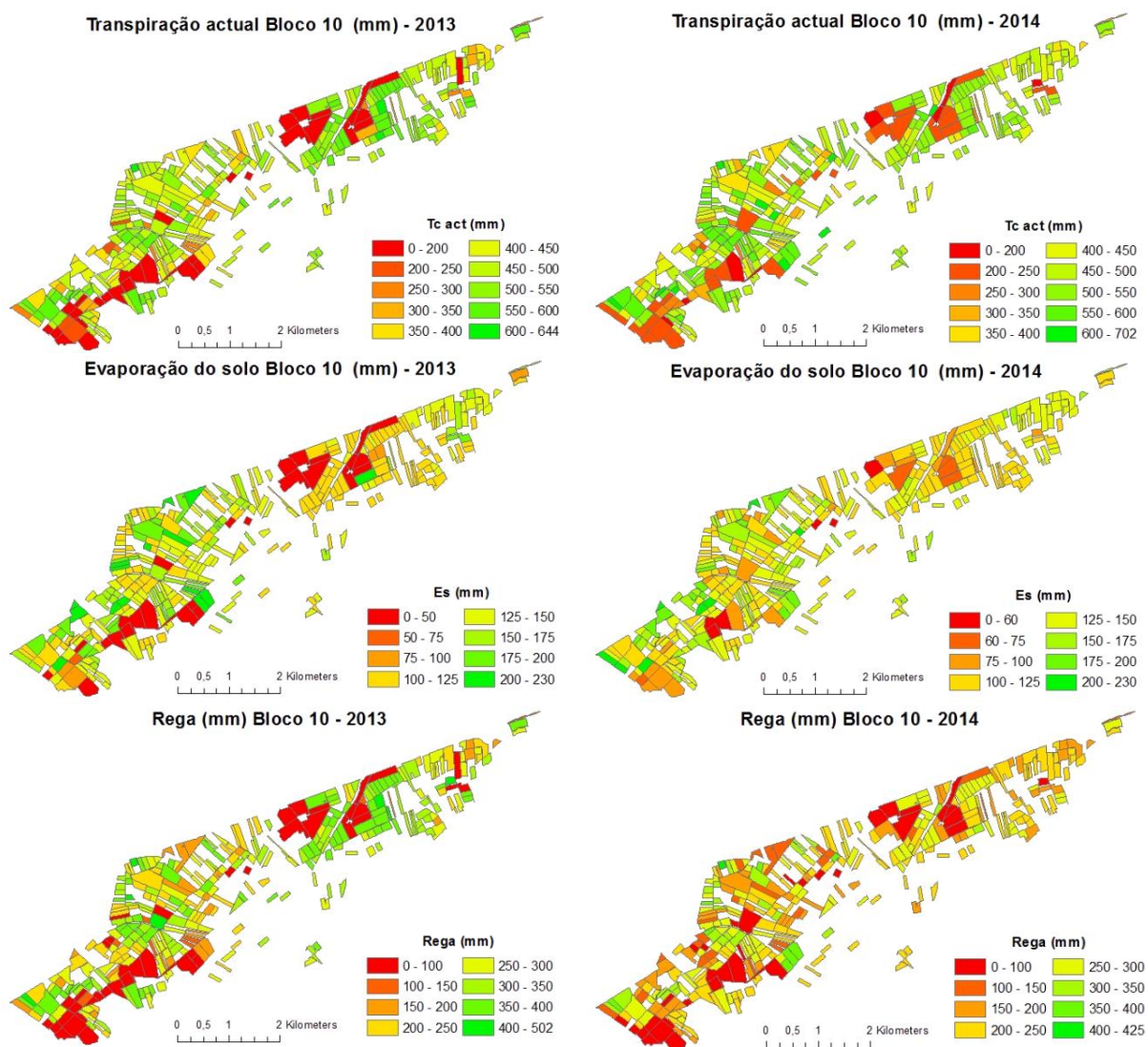


Fig. 7.19. Distribuição espacial da transpiração, evaporação do solo e necessidades de rega no bloco de rega 10 nos anos de 2013 e 2014.

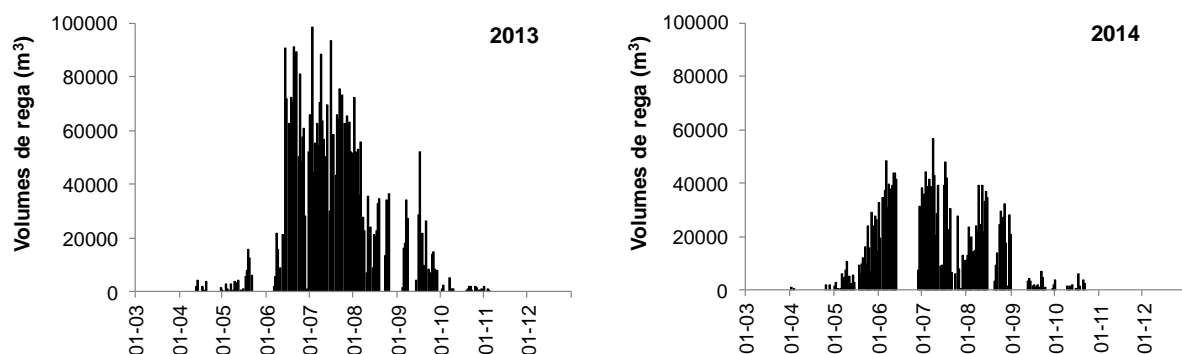


Fig. 7.20. Hidrogramas da procura para a rega no bloco de rega 10 para a estações de crescimento de 2013 e 2014.

Os valores acumulados médios da ET_c , T_c , E_s , da rega e da precipitação para cada uma das culturas regadas do bloco de rega 10 apresentam-se na Tabela 7.8, fazendo-se de seguida uma breve comparação apenas dos valores aqui simulados para a ET_c com os valores obtidos experimentalmente por alguns autores. Assim, no caso do tomate, os valores da ET_c simulados neste estudo são bastante inferiores aos obtidos, por exemplo, por Hanson e May (2005) em Fresno, na Califórnia (528-752 mm). Este facto pode ser explicado por uma possível menor densidade da cultura, a julgar pelas curvas do K_{cb} calculadas com recurso à detecção remota apresentadas na Fig. 7.16, pelo facto do clima em Fresno ser muito mais quente e árido do que o da região da Apúlia e a duração das estações de crescimento (109-148 dias) também serem mais longas do que nesta região (não ultrapassando os 100 dias). Os valores da ET_c para o olival estão dentro da gama de variação prevista para esta cultura em clima mediterrânico, sendo ligeiramente inferiores aos obtidos por Palese et al. (2010) no sul de Itália (660-700 mm) e por Palomo et al. (2002) em Sevilha, sul de Espanha (660 mm). Os valores obtidos para a vinha de uva para vinho são ligeiramente superiores aos obtidos por López-Urrea et al. (2013) em Albacete, centro de Espanha, com a variedade de uva *Tempranillo* (505-550 mm), e inferiores aos obtidos por Munitz et al. (2016), em Israel, com a variedade *Caberner Sauvignon* (756-780 mm). Os valores simulados para a vinha para uva de mesa são próximos dos obtidos por Williams e Ayars (2005), na Califórnia, para a variedade Thompson seedless (631-687 mm). Os valores simulados da ET_c para o pessegueiro são bastante inferiores aos obtidos por Ayars et al (2003), na Califórnia, com uma variedade tardia de pessegueiro (927-1161 mm) e por Abrisqueta et al. (2013), na região de Múrcia, Espanha, com uma variedade precoce (713-996 mm), embora os resultados do primeiro grupo de autores se refiram ao período Março-Outubro e os segundos ao ano inteiro, enquanto que o a estação de crescimento aqui considerada foi de Março a início de Setembro.

Tabela 7.8. Valores acumulados da evapotranspiração actual ($ET_{c\ act}$), transpiração actual ($T_{c\ act}$), evaporação do solo (E_s), rega e precipitação (P) para todas as culturas em 2013 e 2014.

	2013					2014				
	$ET_{c\ act}$	$T_{c\ act}$	E_s	Rega	P	$ET_{c\ act}$	$T_{c\ act}$	E_s	Rega	P
Tomate	329	240	88	227	100	393	282	111	187	145
Alcachofra	514	335	180	149	510	529	376	154	236	283
Olival	644	443	201	234	545	595	416	179	160	444
Uva para vinho	575	446	128	281	195	590	457	133	222	248
Uva de mesa	635	513	122	351	196	634	504	130	282	250
Pessegueiro precoce	600	430	170	255	273	621	485	136	230	292
Pessegueiro tardio	653	496	158	329	246	721	589	132	319	293

7.4. Conclusões

O sistema SIMDualKc-SIG para apoio à gestão da rega ao nível do projecto, consegue captar os impactos da distribuição espacial dos solos, das condições climáticas, das culturas e da densidade/fracção de cobertura (f_c) destas no uso da água, na ET_c , T_c , E_s e nas necessidades de rega das culturas. Para isso o sistema acede e manipula programaticamente os layers geográficos e o objecto ‘geoprocessador’ do ArcMap por forma a executar o geoprocessamento dos dados espaciais, nomeadamente para atribuir a cada parcela o solo e a estação meteorológica dominantes. Relativamente aos dados climáticos, o procedimento inovador de criar uma rede de estações meteorológicas virtuais recortadas à zona de estudo (com a resolução espacial pretendida) e depois efectuar a interpolação espacial dos dados climáticos das estações reais para as virtuais, introduz uma clara melhoria, por exemplo, relativamente ao sistema GISAREG (Fortes et al., 2005), no qual aquela é feita simplesmente através da criação de polígonos de thiesen a partir das estações meteorológicas reais. Para além disso, o sistema SIMDualKc-SIG contempla o uso de índices vegetação (IV) obtidos por detecção remota para a estimação da f_c , e consequentemente, através da relação f_c - h - K_{cb} (Allen e Pereira, 2009), consegue estimar para a distribuição espacial da T_c das culturas (actual e potencial) e a variação espacial das necessidades de rega àquela associada. O cálculo do hidrograma da procura para a rega para uma determinado sector de rega seleccionado ou para todo o bloco de rega, constitui também um importante aspecto para que o modelo possa vir a constituir uma solução para a gestão da rega ao nível do projecto. A aplicação do sistema ao bloco de rega 10 do projecto de rega Sinistra-Ofanto demonstrou explicitamente as capacidades do sistema acima mencionadas.

Capítulo 8

Conclusões e perspectivas futuras

Desde a sua publicação em 2012 (Rosa et al., 2012), altura em que o modelo já dispunha de muitas das valências de modelação actualmente disponíveis, o SIMDualKc tem vindo a ser utilizado com sucesso em várias regiões do mundo para prever o uso da água, a ET_c e a partição desta entre T_c e E_s para uma série de culturas sob a influência do método de rega e de práticas de gestão da rega, do solo e das culturas, como o provam os inúmeros estudos relatados no ponto 3.4 do Capítulo 3. Deste modo, o modelo revela-se como sendo uma ferramenta útil de ajuda à decisão da rega sob variadas condições ambientais, de projecto e de gestão.

Com a presente tese de doutoramento, pretendeu-se abrir ainda mais o ‘leque’ de valências de modelação oferecidas pelo SIMDualKc e testar algumas das já existentes para casos envolvendo alguma complexidade, nomeadamente: *i)* a modelação da ET_c e do uso da água em cobertos lenhosos descontínuos, nomeadamente na presença de uma toalha freática pouco profunda; *ii)* a implementação de um procedimento para a estimação da ET_c e do uso da água em consociações de culturas, através do cálculo de um K_{cb} combinado ($K_{cb\ inter}$) e de um valor combinado da fracção p (p_{inter}) para a consociação, especialmente indicado para quando existe um desfasamento temporal no desenvolvimento das duas culturas consociadas, i.e., para as consociações do tipo *relay strip intercropping*; *iii)* implementação de um procedimento para a consideração dos efeitos de condições transitórias de salinidade do solo na T_c e na E_s das culturas, envolvendo o estado de salinidade do solo no início e no fim de cada estação de crescimento, a tolerância das culturas à salinidade do solo e a correcção dos valores de TAW e RAW em condições salinas; e *iv)* ligação do SIMDualKc a um SIG, no sentido de associar as capacidades de modelação do primeiro às de geoprocessamento e mapeamento do segundo, nomeadamente fazendo uso da detecção remota para cálculo da f_c e do K_{cb} , criando-se assim o sistema SIMDualKc-SIG para apoio à gestão da rega ao nível do projecto.

A modelação da ET_c e do uso da água em cobertos lenhosos descontínuos foi testada pela aplicação do modelo a pomares de pereira ‘Rocha’ e limoeiro, no primeiro caso na presença de uma toalha freática pouco profunda e com uma cobertura vegetal activa nas entrelinhas do pomar. Os resultados demonstraram que o modelo, utilizando a abordagem proposta por Allen e Pereira (2009) para cálculo do K_{cb} a partir da f_c e da altura da cultura, e a de Liu et al. (2006) para cálculo da CR (apenas no caso das pereiras), e uma vez devidamente calibrado,

conseguiu simular correctamente para ambas as culturas as dinâmicas do teor de água do solo (SWC) observado para uma larga gama de variação destes valores e em dois anos com diferentes características climáticas, o que fundamentou os resultados do uso da água, ET_c e partição desta entre T_c e E_s .

Para a cultura do limoeiro constatou-se que os valores de $K_{cb\ full}$ obtidos pela calibração e validação do modelo foram mais baixos do que os propostos por Allen e Pereira (2009), em 0.15 unidades no período intermédio e no fim do período total de crescimento analisado, atingindo essa redução 0.35 unidades no período inicial, devendo-se possivelmente neste último caso esta drástica redução à poda realizada todos os anos no início da primavera e a uma possível e consequente redução no metabolismo da cultura. O modelo detectou a ocorrência stress hídrico em ambas as estações de crescimento, mais severo em 2013 devido a uma condução inadequada da rega, com valores dos rácios $ET_{c\ act}/ET_{c\ pot}$ e $T_{c\ act}/T_{c\ pot}$ a atingirem, respectivamente, 0.72 e 0.69, enquanto que em 2014 estes foram mais elevados, respectivamente, 0.87 e 0.85. A E_s foi reduzida devido à baixa fracção de humedecimento solo pela rega e pelo sombreamento desta pela cultura, com as razões $E_s/ET_{c\ act}$ a atingirem apenas 0.15-0.17.

No estudo de caso do pomar de pereira ‘Rocha’, os valores de $K_{cb\ full}$ foram também reduzidos em 0.1 unidades (para as fases inicial e intermédia, e para o final da estação), relativamente aos propostos por Allen e Pereira (2009). Ao contrário do dos limoeiros, o modelo não detectou a ocorrência de stress hídrico, sendo pois os rácios $ET_{c\ act}/ET_{c\ pot}$ e $T_{c\ act}/T_{c\ pot}$ iguais à unidade, enquanto que a E_s foi bastante reduzida, com a razão $E_s/ET_{c\ act}$ a variar 0.09-0.11 entre 2013 e 2014. Pelo contrário CR foi muito elevada em ambos os anos e réplicas do dispositivo experimental, tendo contribuído em 31% e 50-53% (réplica 1 – réplica 2) para a $ET_{c\ act}$, respectivamente, em 2013 e 2014. O modelo também simulou um elevado uso da água armazenada no solo, 67 mm em 2013 e 52 mm em 2014. Finalmente verificou-se que a contribuição da cobertura vegetal activa na entrelinha do pomar teve uma contribuição desprezável para a ET total do pomar, fruto da baixa fracção da superfície do solo onde esteve presente, à sua gestão por operações de corte e ripagem e à absorção da grande maioria da radiação pela cultura.

Os resultados acima demonstram que o SIMDualKc pode constituir uma ferramenta útil e fiável para apoio à gestão da rega para este tipo de cobertos, inclusivamente na presença de toalhas freáticas pouco profundas. No entanto também mostram a importância da calibração do modelo para a obtenção de resultados fidedignos.

Para testar a nova abordagem para a modelação da ET_c e do uso da água em sistemas de consociações de culturas, o modelo foi aplicado a consociações do tipo *relay strip intercropping* no perímetro de rega de Hetao, na bacia do Rio Amarelo Superior, China, nomeadamente às consociações trigo de primavera-milho (T-M) e trigo de primavera- girassol (T-G) na presença de uma toalha freática pouco profunda, utilizando a aproximação de Liu et al. (2006) para estimar a CR. O modelo foi também aplicado na zona de estudo às respectivas culturas consociadas quando cultivadas isoladamente, i.e., em monocultura, por forma a criar um termo de comparação para os resultados obtidos para as consociações. Os resultados obtidos permitiram uma boa percepção das diferenças ao nível da ET_c , T_c , E_s e CR em consociações de culturas e em sistemas de monocultura. Assim, embora em termos relativos, i.e., em percentagem da $ET_{c\ act}$, a CR para as consociações não tenha diferido muito da CR calculada como a média ponderada desta variável para ambas as culturas consociadas quando cultivadas isoladamente (21-33% e 27-31% da $ET_{c\ act}$, respectivamente, nas monoculturas e nas consociações), sendo portanto elevada em ambos os casos, em termos absolutos a CR foi 41% a 54% superior para as consociações. Isto deveu-se essencialmente à maior duração das estações de crescimento das consociações e consequentemente à maior duração da extracção radicular da água do solo comparativamente às monoculturas. O mesmo aconteceu para a E_s , não diferindo em termos relativos entre os dois sistemas de cultivo mas sendo 49 a 63% superior em termos absolutos nas consociações, devido à maior duração da estação de crescimento destas últimas e ao facto de nestas toda a superfície do solo dentro da parcela/canteiro ser humedecida pela rega, mesmo quando apenas uma das culturas da consociação está presente. Relativamente à T_c actual ($T_{c\ act}$), foi também mais elevada nas consociações, em 22-26% para T-M e 28-30% para T-G, do que a obtida como a média ponderada de $T_{c\ act}$ para as monoculturas correspondentes. Isto deveu-se ao facto de $K_{cb\ inter}$ ser consideravelmente superior à média ponderada dos K_{cb} das duas culturas consociadas quando cultivadas isoladamente, já que $K_{cb\ inter}$ leva em consideração o melhor uso da radiação, a maior rugosidade aerodinâmica e a micro-advecção de energia entre as faixas de cultivo das consociações, sendo este último aspecto especialmente importante quando uma das faixas ainda/já não se encontra cultivada. Consequentemente também a $ET_{c\ act}$ neste tipo de consociações tende a ser mais elevada, no presente estudo em cerca de 250 mm, do que a média ponderada da $ET_{c\ act}$ das duas culturas consociadas quando cultivadas separadamente, para isso também contribuindo a aplicação de maiores quantidades de rega às consociações, logo um menor stresse hídrico, a maior ascensão capilar (CR) e o melhor uso da água armazenada no solo. Assim, a produção de cada uma das culturas da consociação foi maior do

que quando cultivadas isoladamente, em 9-19% para o trigo, 33% para o milho e 32-44% para o girassol. No entanto, a produtividade da água manteve-se a mesma, já que a produção e o uso total de água aumentaram na mesma proporção. Os resultados obtidos são indicativos das vantagens que podem ser alcançadas através da adoção dos sistemas de consociação de culturas, mas também identificam uma grande necessidade em melhorar o uso da água através do ajustamento dos calendários de rega às exigências das culturas e através da redução dos usos não-benéficos da água de rega, ou seja, através do melhoramento da gestão e das tecnologias de rega de superfície. Assim, e como o demonstram os resultados acima mencionados, o SIMDualKc pode ser útil para a elaboração de calendários de rega que conduzam a uma redução dos usos não benéficos da água e ao aumento da produtividade física e/ou económica da água para este tipo de sistema de cultivo.

A avaliação do procedimento para a consideração dos efeitos transitórios da salinidade do solo na T_c e na E_s foi feita em parcelas experimentais cultivadas com milho e sorgo sacarino, regadas com águas doces e salinas (sintéticas). Em ambas as condições, i.e., sob stresse salino e na ausência deste, o SIMDualKc simulou com sucesso as dinâmicas do teor de água do solo observado. O modelo previu diminuições da ET_c e da T_c devido à salinidade do solo que foram suportadas pelos resultados obtidos com modelo HYDRUS-1D usando uma abordagem mais complexa. Por outro lado E_s aumentou com a salinidade, em particular no caso do milho, mais sensível à salinidade, o que se deveu a um menor desenvolvimento e menor cobertura da superfície do solo pelas plantas sob stresse salino, e consequentemente à maior quantidade de energia disponível à superfície do solo, o que favoreceu a evaporação. A capacidade de partição da ET_c pelo modelo revelou-se assim determinante para entender melhor o comportamento das culturas quando a ET_c é influenciada pela salinidade. Sob stresse salino, o SIMDualKc estimou reduções dos rácios $ET_{c\ act}/ET_c$ e $T_{c\ act}/T_c$ para a cultura do milho até, respectivamente, 0.16 e 0.36, enquanto que no HYDRUS-1D essas reduções foram maiores, alcançando, respectivamente, 0.34 e 0.45. No caso do sorgo, o SIMDualKc previu reduções das razões $ET_{c\ act}/ET_c$ e $T_{c\ act}/T_c$ que alcançaram no máximo, respectivamente, 0.08 e 0.15, enquanto o HYDRUS-1D previu decréscimos maiores, até, respectivamente, 0.20 e 0.27. As estimativas do balanço hídrico do solo pelo SIMDualKc foram replicadas de perto pelo HYDRUS-1D, embora as estimativas de $ET_{c\ act}$ e $T_{c\ act}$ dadas por ambos os modelos tenham ficado substancialmente mais próximas no caso do milho do que no caso do sorgo sacarino. Deste modo, a nova abordagem implementada no SIMDualKc para a estimação das reduções de ET_c e T_c devido ao stresse salino pode ser considerada fidedigna, podendo o modelo

constituir uma ferramenta útil para a calendarização e gestão da rega em condições salinas, nomeadamente em regiões com escassez de água.

O sistema SIMDualKc-SIG para apoio à gestão da rega ao nível do projecto, tem a capacidade de captar os efeitos da distribuição espacial dos solos, das condições climáticas, das culturas e da fracção de cobertura (f_c) destas no uso da água, na ET_c , T_c , E_s e nas necessidades de rega das culturas. Para isso acede programaticamente às capacidades de geoprocessamento do SIG para atribuir a cada parcela o solo e a estação meteorológica dominantes. Relativamente à interpolação dos dados climáticos, o SIMDualKc-SIG introduz uma clara melhoria, por exemplo, em relação ao sistema GISAREG (Fortes et al., 2005), no qual aquela é feita simplesmente através da criação de polígonos de thiessen a partir das estações meteorológicas reais, enquanto que no SIMDualKc-SIG primeiro é criada uma rede de estações meteorológicas virtuais recortadas à zona de estudo (com a resolução espacial pretendida) e depois é feita a interpolação espacial dos dados climáticos das estações reais para as virtuais. Para além disso, uma vez que o sistema contempla o uso de índices vegetação (IV) obtidos por detecção remota para a estimação da f_c , e consequentemente, através da relação f_c - h - K_{cb} (Allen e Pereira, 2009), para a estimação da T_c potencial das culturas, o sistema SIMDualKc-SIG consegue estimar a distribuição espacial da T_c actual e a variação espacial das necessidades de rega àquela associadas. O cálculo do hidrograma da procura para a rega para uma determinado sector de rega seleccionado ou para todo o bloco de rega, constitui também um importante aspecto para que o modelo possa vir a constituir uma solução para a gestão da rega ao nível do projecto.

Quanto ao futuro, a principal prioridade relativa ao SIMDualKc prende-se com a migração do actual código para versões mais actualizadas das linguagens de programação da *Microsoft* (VB, C^{++} ou $C\#$) ou para qualquer linguagem compatível com a plataforma *Microsoft.NET*, por forma a resolver problemas de incompatibilidade com as versões do *Windows* em constante actualização. A execução desta migração por programadores profissionais com o auxílio das pessoas envolvidas na sua criação pode fazer com que o SIMDualKc deixe de ser uma ferramenta para uso essencialmente académico para vir a constituir um software comercial mais passível de ser utilizado na prática para a gestão da rega. Outro aspecto importante consiste na implementação da abordagem dos ‘graus-dia’ para a modelação do crescimento e previsão dos estádios fenológicos das culturas, que permitirá estabelecer calendários de rega em harmonia com a maior ou menor sensibilidade ao stresse hídrico daqueles estádios, contribuindo assim para o aumento da produtividade física e económica da água. Por fim, é

importante transformar o sistema SIMDualKc-SIG, que apesar de estar operacional constitui ainda um protótipo, numa verdadeira ferramenta para apoio à gestão da rega ao nível do projecto. Um dos aspectos mais importantes é a automatização do cálculo da f_c a partir das imagens de satélite em ‘bruto’, já que no presente o cálculo dos índices de vegetação obtidos por detecção remota e utilizados pelo modelo para calcular a f_c e consequentemente o K_{cb} , é feita fora do sistema.

Referências bibliográficas

- Abrisqueta, I., Abrisqueta, J.M., Tapia, L.M., Munguía, J.P., Conejero, W., Vera, J., Ruiz-Sánchez, M.C., 2013. Basal crop coefficients for early-season peach trees. *Agric. Water Manage.*, 121, 158-163.
- Aggett, G., McColl, C., 2002. Hydrologic Impacts, Spatial Simulation. In: Shekhar, S., Xiong, H. (eds.), *Encyclopedia of GIS*. 1st Edition. Springer, pp. 462–467.
- Ahuja, L.R., Rojas, K.W., Hanson, J.D., Shaffer, M.J., Ma, L. (Eds.), 1999. *Root Zone Water Quality Model, Modelling Management Effects on Water Quality & Crop Production*. Water Resources Publications, LLC, Colorado, USA, p. 360.
- Akhand, N.A., Rao, N.K., Fraj, M.B., McCann, I.R., 2014. Determination of crop coefficients of forages using weighing Lysimeter in UAE. *Acta Hort.* 1054, 183 -188
- Alfieri, J.G., Kustas, W.P., Prueger, J.H., Hipps, L.E., Evett, S.R., Basara, J.B., Neale, C.M.U., French, A.N., Colaizzi, P., Agam, N., Cosh, M.H., Chavez, J.L., Howell, T.A., 2012. On the discrepancy between eddy covariance and lysimetry-based surface flux measurements under strongly advective conditions. *Advances in Water Resources*, 50, 62–78.
- Allen, R.G., 2000. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *J. Hydrology*, 229, 27-41.
- Allen, R.G., Fisher, D.K., 1990. Low-cost electronic lysimeters. *Trans. ASAE*, 33(6), 1823–1833.
- Allen, R.G., Clemmens, A.J., Burt, C.M., Solomon, K., O'Halloran, T., 2005b. Prediction accuracy for project wide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 131, 24-36.
- Allen, R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L., Burman, R.D., 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agron. J.*, 81, 650-662.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., 2009. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrigation Sci.* 28: 17-34.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, Italy, 300p.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Smith, M., Raes, D., Wright, J.L., 2005. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 131, 2-13.
- Allen, R.G., Wright, J.L., Pruitt, W.O., Pereira, L.S., Jensen, M.E., 2007b. Water requirements. In: Hoffman, G.J., Evans, R.G., Jensen, M.E., Martin, D.L., Elliot, R.L. (eds.), *Design and Operation of Farm Irrigation Systems*. 2nd Edition. ASABE, St Joseph, MI, pp. 208–288.
- Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A., Pereira, L.S., 1994. An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*, 43(2), 1-34.
- Allen, R. G., Tasumi, M. e Trezza, R. 2007a. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC-Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133 (4): 380-394.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Howell, T.A., Jensen, M.E., 2011. Evapotranspiration information reporting; I. Factors governing measurement accuracy. *Agric. Water Manage.* 98, 899-920.

- Alves, I., Pereira, L.S., 2000. Modelling surface resistance from climatic variables? *Agric. Water Manage.*, 42, 371-385.
- Alves, I., Perrier, A., and Pereira, L. S., 1998. Aerodynamic and surface resistances of complete cover crops: How good is the “big leaf”? *Trans. ASAE*, 41(2), 345–351.
- Amayreh, J., Al-Abed, N., 2005. Developing crop coefficients for field-grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under drip irrigation with black plastic mulch. *Agric. Water Manage.* 73, 247–254.
- ASCE-EWRI, 2005. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Technical Committee report to the Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers from the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. ASCE-EWRI, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, VA 20191-4400, 173 pp.
- Ayers, R., Westcot, D., 1985. Water quality for agriculture. *Irrig. Drain. Paper* 29. FAO, Rome.
- Ayars, J.E., Johnson, R.S., Phene, C.J., Trout, T.J., Clark, D.A., Mead, R.M., 2003. Water use by drip-irrigated late-season peaches. *Irrig. Sci.*, 22, 187–194
- Bai, R., Zhang, Z., Hu, Y., Fan, M., Schmidhalter, U., 2011. Improving the salt tolerance of Chinese spring wheat through an evaluation of genotype genetic variation. *Aust. J. Crop Sci.* 5(10):1173-1178
- Baldé, A.B., Scopel, E., Affholder, F., Corbeels, M., Da Silva, F.A.M, Xavier, J.H.V., Wery, J., 2011. Agronomic performance of no-tillage relay intercropping with maize under smallholder conditions in Central Brazil. *Field Crop. Res.* 124, 240–251
- Baldocchi, D.D., Luxmoore, R.J., Hatfield, J.L., 1991. Discerning the forest from the trees: an essay on scaling canopy stomatal conductance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 54, 197-226.
- Ball J.T., Woodrow I.E., Berry J.A., 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In *Progress in Photosynthesis Research*, Vol. IV (ed. I. Biggins), pp. 221–224. Martinus-Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Bastiaanssen, W., Menenti, M., Feddes, R. e Holtslag, A. 1998a. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213: 198-212.
- Beltrão, J., Ben Asher, J., 1997. The effect of salinity on corn yield using the CERES-maize model. *Irrig. Drain. Syst.* 11, 15-28.
- Ben-Gal, A., Ityel, E., Dudley, L., Cohen, S., Yermiyahu, U., Presnov, E., Zigmond, L., Shani, U., 2008. Effect of irrigation water salinity on transpiration and on leaching requirements: A case study for bell peppers. *Agric. Water Manage.* 95, 587–597.
- Ben Mehrez, M., Taconet, O., Vidal-Madjar, D., Valencogne, C., 1992. Estimation of stomatal resistance and canopy evaporation during the HAPEX-MOBILHY experiment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58, 285-313.
- Benli, B., Kodal, S., Ilbeyi, A., Ustun, H., 2006. Determination of evapotranspiration and basal crop coefficient of alfalfa with a weighing lysimeter. *Agric. Water Manage.*, 81, 358-370
- Berengena, J., Gavilán, P., 2005. Reference ET estimation in a highly advective semi-arid environment. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 131 (2).

- Blad, B.L., Rosenberg, N.J., 1974. Lysimetric Calibration of the Bowen-Ratio Energy Balance Method for Evapotranspiration Estimation in the Central Great Plains. *Journal of Applied Meteorology*, 13, 227-236.
- Bodner, G., Loiskandl, W., Kaul, H. P., 2007. Cover crop evapotranspiration under semi-arid conditions using FAO dual crop coefficient method with water stress compensation. *Agric. Water Manage.* 93(3), 85-98.
- Boesten, J.J.T.I. & Stroosnijder, L. (1986). Simple model for daily evaporation from fallow tilled soil under spring conditions in a temperate climate. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 34, 75-90.
- Bonachela, S., Orgaz, F., Villalobos, F.J., Fereres, E., 1999. Measurement and simulation of evaporation from soil in olive orchards. *Irrig Sci*, 18, 205-211.
- Bonachela, S., Orgaz, F., Villalobos, F.J., Fereres, E., 2001. Soil evaporation from drip irrigated olive orchards. *Irrig. Sci.*, 20, 65-71.
- Brenner AJ, Incoll LD (1997) The effect of clumping and stomatal response on evaporation from sparsely vegetated shrublands. *Agric For Meteorol* 84, 187-205.
- Bresler, E., Hoffman, G.J., 1986. Irrigation management for soil salinity control: Theories and tests. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 1552–1560.
- Brisson, N., Bussi re, F., Ozier-Lafontaine, H., Tournebize, R., Sinoquet, H., 2004. Adaptation of the crop model STICS to intercropping. Theoretical basis and parameterisation. *Agronomie* 24: 409–421
- Brooker, R.W., Bennett, A.E., Cong, W-F., Daniell, T.J., George, T.S., Hallett, P.D., Hawes, C., Iannetta, P.P.M., Jones, H.G., Karley, A.J., Li, L., McKenzie, B.M., Pakeman, R.J., Paterson, E., Sch b, C., Shen, J., Squire, G., Watson, C.A., Zhang, C., Zhang, F., Zhang, J., WhiteI, P.J., 2015. Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytol.* 206: 107–117
- Bryla, D.R., Trout, T.J., Ayars, J.E., 2010. Weighing Lysimeters for Developing Crop Coefficients and Efficient Irrigation Practices for Vegetable Crops. *HortScience*, 45(11), 1597-1604.
- Burt, C.M., Howes, D.J., Mutziger, A., 2001. Evaporation estimates for irrigated agriculture in California. In: *Proceedings of the Annual Irrigation Association Conference*, The Irrigation Association, Falls Church, VA. pp 103-110.
- Calera Belmonte, A., Jochum ,A. M., García, A. C., Rodríguez, A. M., Fuster, P. L., 2005. Irrigation management from space: Towards user-friendly products . *Irrigation and Drainage Systems*, 19: 337–353.
- Cammalleri, C., Agnese, C., Ciraolo, G., Minacapilli, M., Provenzano, G., Rallo, G., 2010. Actual evapotranspiration assessment by means of a coupled energy/hydrologic balance model: Validation over an olive grove by means of scintillometry and measurements of soil water contents. *Journal of Hydrology*, 392, 70–82
- Cammalleri, C., Rallo, G., Agnese, C., Ciraolo, G., Minacapilli, M., Provenzano, G., 2013. Combined use of eddy covariance and sap flow techniques for partition of ET fluxes and water stress assessment in an irrigated olive orchard. *Agric. Water Manage.* 120, 89– 97
- Campos, I., Neale, C. M. U., Calera, A., Balbont n, C., González-Piqueras, J., 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric Water Manag*, 98: 45–54
- Cancela, J.J., Fandiño, M., Rey, B.J., Martínez, E.M., 2015. Automatic irrigation system based on dual crop coefficient, soil and plant water status for *Vitis vinifera* (cv Godello and cv Menc a). *Agric. Water Manage.* 151, 52–63.

- Cao, S., Luo, H., Jin, M., Jin, S., Duan, X., Zhou, Y., Chen, W., Liu, T., Jia, Q., Zhang, B., Huang, J., Wang, X., Shang, X., Sun, Z., 2015. Intercropping influenced the occurrence of stripe rust and powdery mildew in wheat. *Crop Prot.* 70, 40–46.
- Carpenter, T.M., Georgakakos, K.P., 2006. Intercomparison of lumped versus distributed hydrologic model ensemble simulations on operational forecast scales. *Journal of Hydrology*, 329, 174–185.
- Castellvi, F., Martínez-Cob, A., 2005. Estimating sensible heat flux using surface renewal analysis and the flux variance method: A case study over olive trees at Sástago (NE of Spain). *Water Resources Research*, 41, 1–10.
- Castellvi, F., Martínez-Cob, A., Pérez-Coveta, O., 2006. Estimating latent and sensible heat fluxes over rice using surface renewal. *Agric. For. Meteorol.*, 139, 164–169.
- Castellví, F., Snyder, R.L., Baldocchi, D.D., 2008. Surface energy-balance closure over rangeland grass using the eddy covariance method and surface renewal analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 1147–1160.
- Castrignanò, A., Katerji, N., Karam, F., Mastrorilli, M., Hamdy, A., 1998. A modified version of CERES-Maize model for predicting crop response to salinity stress. *Ecol. Model.* 111, 107–120.
- Caviglia, O.P., Sadras, V.O., Andrade, F.H. 2004. Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas: I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat-soybean. *Field Crop. Res.* 87(2-3): 117–129.
- Celette, F., Ripoche, A., Gary, C., 2010. WaLIS—A simple model to simulate water partitioning in a crop association: The example of an intercropped vineyard. *Agric. Water Manage.*, 97 1749–1759
- Chai, Q., Yu, A.-Z., Chen, G.-P., Huang, P., 2011. Soil evaporation under sole cropping and intercropping systems and the main driving factors. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* 19(6): 1307–1312 (in Chinese)
- Chang, K.T., 2008. *Programming ArcObjects with VBA: A Task-Oriented Approach*, 2nd Editions, CRC Press, 360 p.
- Chavez, P. S. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote sensing of environment*, 24(3): 459–479.
- Chávez, J.L., Howell, T.A., Copeland, K.S., 2009. Evaluating eddy covariance cotton ET measurements in an advective environment with large weighing lysimeters. *Irrig. Sci.*, 28, 35–50.
- Chen S., Zhang X., Sun H., Ren T., Wang Y., 2010. Effects of winter wheat row spacing on evapotranspiration, grain yield and water use efficiency. *Agric. Water Manage.* 97: 1126–1132
- Chopart, J.L., Mézino, M., Aure, F., Le Mézo, L., Mété, M., Vauclin, M., 2007. OSIRI: A simple decision-making tool for monitoring irrigation of small farms in heterogeneous environments. *Agric. Water Manage.*, 87, 128–138.
- Chowdary, V.M, Rao, N.H., Sarma, P.B.S., 2003. GIS-based decision support system for groundwater assessment in large irrigation project areas. *Agric Water Manage*, 62, 229–252.
- Cohen, Y., Fuchs, M., Green, G.C., 1981. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant, Cell and Environment*, 4, 391–397.
- Coll, L., Cerrudo, A., Rizzalli, R., Monzon, J.P., Andrade, F.H., 2012. Capture and use of water and radiation in summer intercrops in the south-east Pampas of Argentina. *Field Crop. Res.* 134, 105–113

- Conceição N., Ferreira M.I., Pacheco C.A., Fabião M., Boteta L., Silvestre J. 2011. Transpiration from a vineyard in South Portugal - stress coefficients, NDVI and leaf water potential. *Acta Horticulturae* 922:277-284.
- Corwin, D.L., Rhoades, J.D., Šimůnek, J., 2007. Leaching requirements for soil salinity control: Steady-state versus transient models. *Agric. Water Manage.* 90, 165-180.
- Cuesta García, A., Montoro Rodríguez, A., Jochum, A.M., López Fuster, P., Calera Belmonte, A., 2004. Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite. XII Congreso Nacional de Riegos, Logroño, 15–17 Junio 2004, pp. 11.
- D'Urso, G., Calera Belmonte, A., 2006. Operative Approaches to determine crop water requirements from Earth Observation data: Methodologies and Applications, AIP Proceedings, vol. 852. In: International Conference on earth observation for vegetation monitoring and water management, 852, 10–11 November 2005, Napoli, Italy, pp. 14–25.
- D'Urso, G., Richter, K., Calera, A., Osann, M.A., Escadafal, R., J. Garatuza- Pajan, Hanich, L., Perdigão, A., Tapia, J.B., Vuolo, F., 2010. Earth Observation products for operational irrigation management in the context of the PLEIADeS project. *Agric Water Manag.* 98: 271–282.
- Daamen, C.C., 1997. Two source model of surface fluxes for millet fields in Niger. *Agricultural and Forest Meteorology*, 83, 205-230.
- Daamen, C.C., Simmonds, L.P., 1994. Soil water, energy and transpiration-a numerical model of water and energy fluxes in soil profiles and sparse canopies. Department of Soil Science, University of Reading.
- Daamen, C.C., Simmonds, J.S., Wallace, J.S., Laryea, K.B., Sivakumar, M.V.K., 1993. Use of microlysimeters to measure evaporation from sandy soils. *Agriculture and Forest Meteorology*, 65, 159-173.
- Dewar, R.C., 2002. The Ball–Berry–Leuning and Tardieu–Davies stomatal models: synthesis and extension within a spatially aggregated picture of guard cell function. *Plant, Cell and Environment*, 25, 1383-1398
- Ding, R., Kang, S., Li, F., Zhang, Y., Tong, L., Sun, Q., 2010. Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of northwest China. *Agric. Water Manage.* 98, 87– 95.
- Ding, R., Kang, S., Du, T., Hao, X., Zhang, Y., 2014. Scaling Up Stomatal Conductance from Leaf to Canopy Using a Dual-Leaf Model for Estimating Crop Evapotranspiration. *PLoS ONE* 9(4): e95584. doi:10.1371/journal.pone.0095584.
- Ding, R., Kang, S., Zhang, Y., Hao, X., Tong, L., Du, T., 2013. Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching. *Agric. Water Manage.* 127, 85– 96
- Djaman, K., Irmak, S., 2013. Actual crop evapotranspiration and alfalfa- and grass-reference crop coefficients of maize under full and limited irrigation and rainfed conditions. *J. Irrig. Drain. Eng.* 139, 433-446.
- Domínguez, A., Tarjuelo, J.M., de Juan, J.A., López-Mat,a E., Breidy, J., Karam, F., 2011. Deficit irrigation under water stress and salinity conditions: The MOPECO-Salt Model. *Agric. Water Manage.* 98, 1451–1461.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1977. Crop Water Requirements. Irrig. and Drainage Paper No. 24, FAO, Rome, Italy, 197p.

- Doorenbos, J., Kassam, A. H., 1979. Yield response to water. Irrig. Drain. Paper 33, FAO, Rome, 193 pp.
- Du, J., Yang, P., Li, Y., Ren, S., Li, X., Xue, Y., Wang, L., Zhao, W. 2011. An analysis of the inter-annual spatial and temporal variation of the water table depth and salinity in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia, China. In: D. Li, Y. Liu, and Y. Chen (Eds.) Computer and Computing Technologies in Agriculture, Springer Berlin Heidelberg, pp 155-177.
- Edwards, W.R.N., Warwick N.W.M., 1984. Transpiration from a kiwifruit vine as estimated by the heat pulse technique and the Penman-Monteith equation. New Zealand Journal of Agricultural Research, 27, 537-543.
- Eisenhauer, J.G., 2003. Regression through the origin. Teaching Statistics 25(3), 76-80
- Er-Raki, S., Chehbouni, A., Ezzahar, J., Khabba, S., Boulet, G., Hanich, L., Williams, D. 2009. Evapotranspiration Partitioning from Sap Flow and Eddy Covariance Techniques for Olive Orchards in Semi-Arid Region. Acta Hort., 846, 201-208.
- Ezzahar, J., Chehbouni, A., Er-Raki, S., Hanich, L., 2009. Combining a large aperture scintillometer and estimates of available energy to derive evapotranspiration over several agricultural fields in a semi-arid region. Plant Biosystems, 00(0), 1-13.
- Fan Z., Chai Q., Huang G., Yu A., Huang P., Yang C., Tao Z., Liu H., (2013) Yield and water consumption characteristics of wheat/maize intercropping with reduced tillage in an Oasis region. Europ. J. Agronomy 45, 52– 58
- Fandiño, M., Cancela, J.J., Rey, B.J., Martínez, E.M., Rosa, R.G., Pereira, L.S., 2012. Using the Dual-kc approach to model evapotranspiration of albariño vineyards (North-west Spain) with consideration of active ground cover. Agric. Water Manage. 112, 75–87.
- Fandiño, M., Olmedo, J.L., Martínez, E.M., Valladares, J., Paredes, P., Rey, B.J., Mota, M., Cancela, J.J., Pereira, L.S., 2015. Assessing and modelling water use and the partition of evapotranspiration of irrigated hop (*Humulus lupulus*), and relations of transpiration with hops yield and alpha-acids. Ind. Crop. Prod. 77, 204–217
- FAO, 2014. FAOSTAT. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. URL <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/E>. Last accessed on 08.08.15.
- FAO, 1992.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zaradny, H., 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
- Feng, Z.Z., Wang, X.K., Feng, Z.W. 2005. Soil N and salinity leaching after the autumn irrigation and its impact on groundwater in Hetao Irrigation District, China. Agric. Water Manage. 71, 131-143.
- Ferreira, M.I., Valancogne, C., Daudet, F., Ameglio, T., Pacheco, C.A. & Michaelsen, J., 1996. Evapotranspiration and crop-water relations in a peach orchard. In: Camp, C.R., Sadler, E.J. & Yoder, R.E. (ed.), Proc. International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, November 3-6 1996, San Antonio, Texas, p. 61-68.
- Ferretti, D.F., Pendall, E., Morgan, J.A., Nelson, J.A., LeCain, D., Mosier, A. R., 2003. Partitioning evapotranspiration fluxes from a Colorado grassland using stable isotopes: Seasonal variations and ecosystem implications of elevated atmospheric CO₂. Plant and Soil, 254, 291-303.
- Fortes, P.S., Platonov, A.E., Pereira, L.S., 2005. GISAREG—A GIS based irrigation scheduling simulation model to support improved water use. Agric Water Manag, 77, 159–179

- Francone, C., Cassardo, C., Spanna, F., Alemanno, L., Bertoni, D., Richiardone R., Vercellino I., 2010. Preliminary Results on the Evaluation of Factors Influencing Evapotranspiration Processes in Vineyards. *Water*, 2, 916-937; doi:10.3390/w2040916
- Gallardo, M., Snyder, R.L., Schulbach, K. & Jackson, L.E., 1996. Crop growth and water use model for lettuce. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 122, 354-359.
- Gao, Y., Duan, A., Sun, J., Li, F., Liu, Z., Liu, H., Liu, Z., 2009. Crop coefficient and water-use efficiency of winter wheat/spring maize strip intercropping. *Field Crop. Res.* 111, 65–73
- Gao, Y., Wu, P., Zhao, X., Wang, Z., 2014a. Growth, yield, and nitrogen use in the wheat/maize intercropping system in an arid region of northwestern China. *Field Crop. Res.* 167 19–30
- Gao, Y., Yang, L., Shen, X., Li, X., Sun, J., Duan, A., Wu, L., 2014b. Winter wheat with subsurface drip irrigation (SDI): Crop coefficients, water-use estimates, and effects of SDI on grain yield and water use efficiency. *Agric. Water Manage.* 146, 1–10.
- Garatuza-Payan, J., Watts, C. J., 2003. The use of remote sensing for estimating ET in NW Mexico. ICID Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions, 17 Sept. 2003.
- Garcia, M., Raes, D., Allen, R., Herbas, C., 2004. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). *Agic. For. Meteorol.* 125, 67–82.
- Gavilán, P., Berengena, J., 2007. Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. *Irrig. Sci.*, 25, 127-140.
- Ge, P., Ma, C., Wang, S., Gao, L., Li, X., Guo, G., Ma, W., Yan, Y., 2012. Comparative proteomic analysis of grain development in two spring wheat varieties under drought stress. *Anal Bioanal Chem* 402:1297–1313
- Gebler S., Hendricks Franssen, H.-J., Pütz, T., Post, H., Schmidt, M., Vereecken, H. 2015. Actual evapotranspiration and precipitation measured by lysimeters: a comparison with eddy covariance and tipping bucket. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 2145–2161.
- George, B.A., Shende, S.A., Raghuwanshi, N.S., 2000. Development and testing of an irrigation scheduling model. *Agric. Water Manage.*, 46, 121-136.
- George, B. A., Raghuwanshi, N.S., Singh, R., 2004. Development and testing of a GIS integrated irrigation scheduling model. *Agric Water Manag*, 66, 221–237
- Giménez, L., García-Petillo, M., Paredes, P., Pereira, L.S., 2016. Predicting maize transpiration, water use and productivity for developing improved supplemental irrigation schedules in western Uruguay to cope with climate variability. *Water*, 8, 309; doi:10.3390/w8070309
- Giménez, L., Paredes, P., Pereira, LS, 2017. Water use and yield of soybean under various irrigation regimes and severe water stress. Application of AquaCrop and SIMDualKc models. *Water*, 9, 393; DOI:10.3390/w9060393
- Girona, J., Mata, M., Fereres, E., Goldhamer, D.A., Cohen, M., 2002. Evapotranspiration and soil water dynamics of peach trees under water deficits. *Agric. Water Manage.*, 54, 107-122.
- Girona, J., Marsal, J., Mata, M., del Campo, J., 2003 Pear crop coefficients obtained in a large weighing lysimeter. In: ISHS Acta Horticulturae 664: IV international symposium on irrigation of horticultural crops, 6 pp.
- GIS Ag Maps 2014. <http://www.gisagmaps.com/> (ultimo acesso: Janeiro, 2017).
- Goldhamer, D.A., Fereres, E., Mata, M., Girona, J., Cohen, M., 1999. Sensitivity of Continuous and Discrete Plant and Soil Water Status Monitoring in Peach Trees Subjected to Deficit Irrigation. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 124(4), 437–444.

- Gong, D., Kang, S., Yao, L., Zhang, L., 2007. Estimation of evapotranspiration and its components from an apple orchard in northwest China using flow and water balance methods. *Hydrological Processes*, 21, 931-938.
- González, M.G., Ramos, T.B., Carlesso, R., Paredes, P., Petry, M.T., Martins, J.D., Aires, N.P., Pereira, L.S., 2015. Modelling soil water dynamics of full and deficit drip irrigated maize cultivated under a rain shelter. *Biosyst. Eng.* 132, 1-18.
- Gonzalez-Dugo, M.P., Neale, C.M.U., Mateos, L., Kustas, W.P., Prueger, J.H., Anderson, M.C., Li, F., 2009. A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149: 1843–1853
- Granier, A., Biron, P., Lemoine, D., 2000. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100, 291-308.
- Grieve, C., Grattan, S., Maas, E., 2012. Plant salt tolerance. In: Wallender, W.W. and Tanji, K.K. (Eds.), *Agricultural Salinity Assessment and Management*, Second Edition, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No.71. ASCE, New York, pp. 405-459.
- Grismer, M.E., Gates, T.K., 1988. Estimating saline water table contributions to crop water use. *Calif. Agric.*, 42(2), 23-24.
- Guerra, L.C., Hoogenboom, G., Hook, J.E., Thomas, D.L., Boken, V.K., Harrison, K.A., 2005. Evaluation of on-farm irrigation applications using the simulation model EPIC. *Irrig. Sci.*, 23, 171-181.
- Ham, J.M., Heilman, J.L., Lascano, R.J., 1990. Determination of soil water evaporation and transpiration from energy balance and stem flow measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 52, 287-301.
- Hanson, B.R., May, D.M., 2006. New crop coefficients developed for high-yield processing tomatoes. *California Agriculture*, 60(2), 95-99.
- Heijmans, M.M.P.D., Arp, W.J., Chapin III, F.S., 2004. Carbon dioxide and water vapour exchange from understory species in boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 123, 135-147.
- Herbst, M., Kappen, L., Thamm, F., Vanselow, R., 1996. Simultaneous measurements of transpiration, soil evaporation and total evaporation in a maize field in northern Germany. *Journal of Experimental Botany*, 47(305), 1957-1962.
- HLPE, 2012. *Food Security and Climate Change. A Report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security*, Rome.
- HLPE, 2015. *Water for food security and nutrition. A Report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security*, Rome.
- Hoedjes, J.C.B., Chehbouni, A., Ezzahar, J., De Bruin, H.A.R., 2007. Comparison of Large Aperture Scintillometer and Eddy Covariance Measurements: Can Thermal Infrared Data Be Used to Capture Footprint-Induced Differences? *Journal of Hydrometeorology*, 8, 144-159.
- Hoffman, G.J., Shalhevet, J., 2007. Controlling salinity. In: Hoffman, G.J., Evans, R.G., Jensen, M.E., Martin, D.L., Elliot, R.L. (Eds.), *Design and Operation of Farm Irrigation Systems*, second ed. St. Joseph, MI: ASABE, pp. 160–207.
- Hoffman, G.J., van Genuchten, M.Th., 1983. Soil properties and efficient water use: Water management for salinity control. In: Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R. (eds.), *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. American Society of Agronomy, Madison, Wis., pp. 73–85.

- Homaei, M., Dirksen, C., Feddes, R.A., 2002. Simulation of root water uptake I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. *Agric. Water Manage.* 57, 89-109.
- Howell, T.A., Evett, S.R., Schneider, A.D., Dusek, D.A., Copeland, K.S., 2000. Irrigated fescue grass ET compared with calculated reference grass ET. In: *Proceedings of fourth National Irrigation Symposium*, ASAE, Phoenix, AZ, pp. 228–242.
- Howell, T.A., Evett, S.R., Tolk J.A., Copeland, K.S., Colaizzi, P.D., Gowda, P.H., 2008. Evapotranspiration of corn and forage sorghum for silage. In: *World Environmental and Water Resources Congress 2008*, [http://dx.doi.org/10.1061/40976\(316\)88](http://dx.doi.org/10.1061/40976(316)88)
- Hunsaker, D.J., Pinter Jr, P.J., Kimball, B.A., 2005. Wheat basal crop coefficients determined by normalized difference vegetation index. *Irrigation Sci.*, 24: 1–14
- Hutson, J.L., Wagenet, R.J., 1992. LEACHM: Leaching Estimation and Chemistry Model: A Process based Model of Water and Solute Movement Transformations, Plant Uptake and Chemical Reactions in the Unsaturated Zone. *Continuum*, vol. 2. Water Resources Inst, Cornell University, Ithaca, NY, Version 3.
- IPCC, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. 2014, Cambridge, United Kingdom/New York, NY, USA
- Irmak, S., Mutiibwa, D., 2009. On the Dynamics of Evapotranspiration Losses from Penman-Monteith with Fixed and Variable Canopy Resistance During Partial and Complete Maize Canopy. *Transactions of the ASABE*, 52(4), 1139-1153.
- Irmak, S., Howell, T.A., Allen, R.G., Payero, J.O., Martin, D.L., 2005. Standardized ASCE Penman-Monteith: impact of sum-of-hourly vs. 24-h-timestep computations at reference weather stations. *Trans. ASAE*, 48(2), 1063-1077.
- Itenfisu, D., Elliott, R.L., Allen, R.G., Walter, I.A., 2003. Comparison of reference evapotranspiration calculations as a part of the ASCE standardization effort. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 129 (6), 440–448.
- IUSS Working Group WRB. 2014. *World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106*. FAO, Rome.
- Jarvis PG., 1976. The interpretation of the variations in water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London, Ser. B* 273: 593-610.
- Jarvis, N.J., 1989. A simple empirical model of root water uptake. *J. Hydrol.* 107, 57-72.
- Jensen, M.E., Burman, R.D., Allen, R.G. (Eds.), 1990. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. Am. Soc. Civ. Eng. Manual No. 70, 332 pp.
- Jia, X., Dukes, M.D., Jacobs, J.M., Irmak, S., 2006. Weighing Lysimeters for Evapotranspiration Research in a Humid Environment. *Transactions of the ASABE*, 49(2), 1-12.
- Jiang, Y., Xu, X., Huang, Q., Huo, Z., Huang, G., 2015. Assessment of irrigation performance and water productivity in irrigated areas of the middle Heihe River basin using a distributed agro-hydrological model. *Agric. Water manage.*, 147, 67-81.
- Johnson, R.S., Ayars, J., Trout, T., Mead, R., Phene, C., 2000. Crop coefficients for mature peach trees are well correlated with midday canopy light interception. *Acta Horticulturae*, 537, 455-460
- Johnson, R.S., Williams, L.E., Ayars, J.E., Trout, T.J., 2005. Weighing lysimeters aid study of water relations in tree and vine crops. *California Agriculture*, 59 (2), 133-136.

- Jovanovic, N.Z., Annandale, J.G., Nel, A.A., 2000. Calibration and validation of the SWB model for sunflower (*Helianthus annuus* L.), South African Journal of Plant and Soil, 17:3, 117-123
- Kandelous, M.M., Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th, Malek, K., 2011. Soil water content distributions between two emitters of a subsurface drip irrigation system. Soil Sci. Soc. Am. J. 75, 488-497.
- Kanton, R.A.L., Dennett, M.D. 2004. Water uptake and use by morphologically contrasting maize/pea cultivars in sole and intercrops in temperate conditions. Expl. Agric., 40: 201-214
- Karam, F., Lahoud, R., Masaad, R., Kabalan, R., Breidi, J, Chalita, C., Rouphael, Y., 2007. Evapotranspiration, seed yield and water use efficiency of drip irrigated sunflower under full and deficit irrigation conditions. Agric. Water Manage. 90: 213 – 223
- Kashyap, P.S., Panda, R.K., 2001. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. Agric. Water Manage., 50, 9-25
- Katerji, N., Perrier, A., 1983. Modeâlisâtion de l'évapotranspiration réelle ETR d'une parcelle de luzerne: rôle d'un coefficient cultural. Agronomie, 3(6), 513-521.
- Katerji, N., Rana, G., 2006. Modelling evapotranspiration of six irrigated crops under Mediterranean climate conditions. Agricultural and Forest Meteorology, 138, 142-155.
- Katerji, N., van Hoorn, J.W., Hamdy, A., Karam, F., Mastrorilli, M., 1996. Effect of salinity on water stress, growth, and yield of maize and sunflower. Agric. Water Manage. 30, 237-249.
- Kato T., Kamichika M., 2006. Determination of a crop coefficient for evapotranspiration in a sparse sorghum field. Irrig. Drain. 55, 165–175.
- Keating, B.A., Carberry, P.S. 1993. Resource capture and use in intercropping: solar radiation. Field Crop. Res., 34(3-4): 273-301.
- Khaledian, M.R., Mailhol, J.C., Ruelle, P., Rosique, P., 2009. Adapting PILOTE model for water and yield management under direct seeding system: The case of corn and durum wheat in a Mediterranean context. Agric. Water Manage., 96, 757-770.
- Kim, J., Verma, S.B., 1991. Modeling canopy stomatal conductance in a temperate grassland ecosystem. Agricultural and Forest Meteorology, 55, 149-166.
- Kjaergaard, J.H., Plauborg, F., Mollerup, M., Petersen, C.T., Hansen, S., 2008. Crop coefficients for winter wheat in a sub-humid climate regime. Agric. Water Manage. 95: 918-924
- Knörzer, H., Graeff-Hönninger, S., Guo, B., Wang, P., Claupein, W., 2009. The rediscovery of intercropping in China: A traditional cropping system for future Chinese agriculture – A Review. In: E. Lichtfouse (ed.), Climate Change, Intercropping, Pest Control and Beneficial Microorganisms, Sustainable Agriculture Reviews 2, 13-44
- Knörzer, H., Grözinger, H., Graeff-Hönninger, S., Hartung, K., Piepho, H.-P., Claupein, W., 2011. Integrating a simple shading algorithm into CERES-wheat and CERES-maize with particular regard to a changing microclimate within a relay-intercropping system. Field Crop. Res. 121, 274–285.
- Köstner, B., Falge, E.M., Alsheimer, M., Geyer, R. & Tenhunen, J.D., 1998a. Estimating tree canopy water use via xylem sapflow in an old Norway spruce forest and a comparison with simulation-based canopy transpiration estimates. Ann. Sci. For., 55, 125-139.
- Köstner, B., Granier, A. & Cermák, J., 1998b. Sapflow measurements in forest stands: methods and uncertainties. Ann. Sci. For., 55, 13-27.

- Köstner, B., Schulze, E., Kelliher, F.M., Hollinger, D.Y., Byers, J.N., Hunt, J.E., McSeveny, T.M., Meserth, R. & Weir, P.L., 1992. Transpiration and canopy conductance in a pristine broad-leaved forest of *Nothofagus*: an analysis of xylem sap flow and eddy correlation measurements. *Oecologia*, 91, 350-359.
- Ko, J., Piccinni, G., Marek, T., Howell, T., 2009. Determination of growth-stage-specific crop coefficients (K_c) of cotton and wheat. *Agric. Water Manage.* 96: 1691–1697
- Kottek, M, Grieser, J, Beck, C, Rudolf, B, Rubel, F., 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 15: 259-263.
- Kustas, W.P., Norman, J.M. 1997. A two-source approach for estimating turbulent fluxes using multiple angle thermal infrared observations. *Water Resources Research*, 33(6), 1495–1508.
- Kustas, W.P., Norman, J.M. 1999. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94, 13–29.
- Lamsal, K., Paudyal, G.N., Saeed, M., 1999. Model for assessing impact of salinity on soil water availability and crop yield. *Agric. Water Manage.* 41, 57-70.
- Lebon, E., Dumas, V., Pieri, P., Schultz, H.R., 2003. Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Functional Plant Biology*, 30, 699-710.
- Lecina, S., Martinez-Cob, A., Pérez, P.J., Villalobos, F.G., Baselga, J.J., 2003. Fixed versus bulk canopy resistance for reference evapotranspiration estimation using the Penman–Monteith equation under semiarid conditions. *Agric. Water Manage.*, 60, 181-198.
- Legates, D.R., McCabe Jr, G.J., 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resour. Res.* 35, 233–241.
- Letey, J., and G. L. Feng (2007), Dynamic versus steady-state approaches to evaluate irrigation management of saline waters, *Agric. Water Manage.*, 91, 1–10.
- Letey, J., Dinar, A., Knapp, K.C., 1985. Crop-water production function model for saline irrigation waters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 1005-1009.
- Letey, J., Hoffman, G.J., Hopmans, J.W., Grattan, S.R., Suarez, D., Corwin, D.L., Oster, J.D., Wu, L., Amrhein, C., 2011. Evaluation of soil salinity leaching requirement guidelines. *Agric. Water Manage.* 98, 502–506.
- Leuning R., 1995. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C₃ plants. *Plant, Cell and Environment*, 18, 339-355
- Leuning, R., Condon, A.G., Dunin, F.X., Ziegler, S., 1994. Rainfall interception and evaporation from soil below a wheat canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 67, I 221-238
- Li, L., Sun, J., Zhang, F., Li, X., Yang, S, Rengel, Z., 2001. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients. *Field Crop. Res.* 71 (2), 123-137
- Li, S., Kang, S., Zhang, L., Li, F., Zhu, Z., Zhang, B., 2008a. A comparison of three methods for determining vineyard evapotranspiration in the arid desert regions of northwest China. *Hydrological Processes*, 22, 4554–4564
- Li, S., Kang, S., Li, F., Zhang, L., 2008b. Evapotranspiration and crop coefficient of spring maize with plastic mulch using eddy covariance in northwest China. *Agric. Water Manage.*, 95, 1214-1222.

- Li, X., Shi, H., Šimunek, J., Gong, X., Peng, Z., 2015. Modeling soil water dynamics in a drip-irrigated intercropping field under plastic mulch. *Irrig. Sci.*, DOI 10.1007/s00271-015-0466-4
- Li, L., Sun, J., Zhang, F., Guo, T., Bao, X., Smith, F.A., Smith, S.E., 2006. Root distribution and interactions between intercropped species. *Oecologia* 147: 280–290
- Li, C-J., Li, Y-Y., Yu, C-B., Sun, J-H., Christie, P., An, M., Zhang, F-S., Li, L., 2011a. Crop nitrogen use and soil mineral nitrogen accumulation under different crop combinations and patterns of strip intercropping in northwest China. *Plant Soil* 342: 221-231
- Li, Q.-Z., Sun, J.-H., Wei, X.-J., Christie, P., Zhang, F.-S., Li, L., 2011b. Overyielding and interspecific interactions mediated by nitrogen fertilization in strip intercropping of maize with faba bean, wheat and barley. *Plant Soil* 339: 147–161
- Li, L., Sun, J., Zhang, F., 2011c. Intercropping with wheat leads to greater root weight density and larger below-ground space of irrigated maize at late growth stages. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 57:1, 61-67,
- Li, R., Shi, H., Flerchinger, G.N., Akae, T., Wang, C., 2012. Simulation of freezing and thawing soils in Inner Mongolia Hetao Irrigation District, China. *Geoderma* 173–174, 28–33
- Li, X., Yang, P., Ren, S., Li, Y., Liu, H., Du, J., Li, P., Wang, C., Ren, L., 2010. Modeling cherry orchard evapotranspiration based on an improved dual-source model. *Agric. Water manage.*, 98, 12-18.
- Li, L., Yu, Q., Su, Z., van der Tol, C., 2009. A simple method using climatic variables to estimate canopy temperature, sensible and latent heat fluxes in a winter wheat field on the North China Plain. *Hydrol. Proces.*, 23, 665-674.
- Lithourgidis, A.S., Dordas, C.A., Damalas, C.A., Vlachostergios, D.N., 2011. Annual intercrops: an alternative pathway for sustainable agriculture. *Aust. J. Crop Sci.* 5(4):396-410.
- Liu, Y., Luo, Y., 2010. A consolidated evaluation of the FAO-56 dual crop coefficient approach using the lysimeter data in the North China Plain. *Agric. Water Manage.*, 97, 31-40.
- Liu, Y., Pereira, L.S., 2000. Validation of FAO methods for estimating crop coefficients. *Transactions of the CSAE*, 16 (5), 26-30 (in Chinese).
- Liu, Y., Pereira, L.S., Fernando, R.M., 2006. Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: Parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation. *Agric. Water Manage.* 84, 27-40.
- Liu, S. B., Chai, Q., Huang, G.B., 2013. Relationships among soil respiration, soil temperature and dry matter accumulation for wheat-maize intercropping in an arid environment. *Can. J. Plant Sci.* 93: 715_724.
- Liu, C., Sun, G., McNulty, S.G., Kang, S., 2015. An Improved Evapotranspiration Model for na Apple Orchard in Northwest China. *Transactions of the ASABE*, 58(5), 1253-1264.
- Liu, C., Zhang, X., Zhang, Y., 2002. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111, 109–120.
- López-Urrea, R., Montoro, A., González-Piqueras, J., López-Fuster, P., Fereres, E., 2009a. Water use of spring wheat to raise water productivity. *Agric. Water Manage.* 96: 1305-1310

- López-Urrea, R., Martín de Santa Olalla, F., Montoro, A., López-Fuster, P., 2009b. Single and dual crop coefficients and water requirements for onion (*Allium cepa* L.) under semiarid conditions. *Agric. Water Manag.* 96 (6), 1031–1036.
- López-Urrea, R., Montoro, A., Mañas, F., López-Fuster, P., Fereres, E., 2012. Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements of mature ‘Tempranillo’ wine grapes. *Agric. Water Manage.*, 112, 13–20.
- López-Urrea, R., Montoro, A., Trout, T.J., 2014. Consumptive water use and crop coefficients of irrigated sunflower. *Irrigation Sci.* 32(2), 99–109.
- Lovelli, S., Pizza, S., Caponio, T., Rivelli, A.R., Perniola, M., 2005. Lysimetric determination of muskmelon crop coefficients cultivated under plastic mulches. *Agric. Water Manag.* 72, 147–159.
- Lundblad, M., Lagergren, F., Lindroth, A., 2001. Evaluation of heat balance and heat dissipation methods for sapflow measurements in pine and spruce. *Ann. For. Sci.*, 58, 625–638.
- Maas, E.V., Hoffman, G.J., 1977. Crop salt tolerance-current assessment. *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 103, 115–134.
- Magnani, F., Leonardi, S., Tognetti, R., Grace, J., Borghetti, M., 1998. Modelling the surface conductance of a broad-leaf canopy: effects of partial decoupling from the atmosphere. *Plant, Cell and Environment*, 21, 867–879.
- Malek, E., Bingham, G.E., 1993. Comparison of the Bowen ratio-energy balance and the water balance methods for the measurement of evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 146, 209–220.
- Malezieux, E., Crozat, Y., Dupraz, C., Laurans, M., Makowski, D., Ozier-Lafontaine, H., Rapidel, B., de Tourdonnet, S., Valantin-Morison, M., 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 29, 43–62.
- Mao, L.L., Zhang, L.Z., Li, W.Q., van der Werf, W., Sun, J.H., Spiertz, H., Li, L., 2012. Yield advantage and water saving in maize/pea intercrop. *Field Crop. Res.* 138: 11–20.
- Marek, T., Piccinni, G., Schneider, A., Howell, T., Jett, M., Dusek, D., 2006. Weighing Lysimeters for the Determination of Crop Water Requirements and Crop Coefficients. *Applied Engineering in Agriculture*, 22(6), 851–856.
- Martins, J.D., Rodrigues, G.C., Paredes, P., Carlesso, R., Oliveira, Z.B., Knies, A.E., Petry, M.T., Pereira, L.S., 2013. Dual crop coefficients for maize in southern Brazil: model testing for sprinkler and drip irrigation and mulched soil. *Biosystems Eng.* 115, 291–310.
- Mastrorilli, M., Katerji, N., Rana, G., Nouna, B.B., 1998. Daily actual evapotranspiration measured with TDR technique in Mediterranean conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 90, 81–89.
- Mastrorilli, M., Katerji, N., Rana, G., 1999. Productivity and water use efficiency of sweet sorghum as affected by soil water deficit occurring at different vegetative growth stages. *Eur. J. Agron.* 11, 207–215.
- Mateos, L., González-Dugo, M.P., Testi, L., Villalobos, F.J., 2013. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. I. Method validation. *Agricultural Water Management*, 125 : 81–91.
- Mau, Y., Porcorato, A., 2015. A dynamical system approach to soil salinity and sodicity. *Adv. Water Resour.* 83, 68–76.
- Miao, Q., Shi, H., Gonçalves, J.M., Pereira, L.S., 2015. Field assessment of basin irrigation performance and water saving in Hetao, Yellow River basin: Issues to support irrigation systems modernization. *Biosystems Eng.*, 136: 102–116.

- Miao, Q., Rosa, R.D., Shi, H., Paredes, P., Zhu, L., Dai, J., Gonçalves, J.M., Pereira, L.S., 2016. Modeling water use, transpiration and soil evaporation of spring wheat-maize and spring wheat-sunflower relay intercropping using the dual crop coefficient approach. *Agric. Water Manage.* 165, 211–229 doi:10.1016/j.agwat.2015.10.024
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and Environment. *Symposia, Society of Experimental Biology*, 19, 205-234.
- Monteith, J.L., 1985. Evaporation from land surfaces: progress in analysis and prediction since 1948. *ASAE Publication*, 14-85, 4-12.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50 (3), 885–900.
- Munitz, S., Schwartz, A. and Netzer, Y. 2016. Evaluation of seasonal water use and crop coefficients for ‘Cabernet Sauvignon’ grapevines as the base for skilled regulated deficit irrigation. *Acta Hort. (ISHS)*, 1115, 33-40.
- Munz, S., Feike, T., Chen, Q., Claupein, W., Graeff-Hönniger, S., 2014. Understanding interactions between cropping pattern, maize cultivar and the local environment in strip-intercropping systems. *Agric. Forest Meteorol.* 195–196, 152–164
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10(3), 282-290.
- Netzer, Y., Yao, C., Shenker, M., Bravdo, B.A., Schwartz, A., 2009. Water use and the development of seasonal crop coefficients for Superior Seedless grapevines trained to an open-gable trellis system. *Irrig Sci.*, 27:109–120.
- Ni, X., 2014. Comparison of yields of various sunflower varieties. *Modern Agric. Technol.* 2014(3), 110-111 (in Chinese)
- Noilhan, J., Planton, S., 1989. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Weather Rev.*, 117, 536–549.
- Norman, J.M., Kustas, W.P., Humes, K.S., 1995: Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agric. For. Meteorol.*, 77, 263–293.
- Odhiambo, L.O., Yoder, R.E., Yoder, D.C., Hines, J.W., 2001. Optimization of fuzzy evapotranspiration model through neural training with input-output examples. *Trans. ASAE*, 44 (6), 1625–1633.
- Orgaz, F., Testi, L., Villalobos, F.J., Fereres, E., 2006. Water requirements of olive orchards-II: determination of crop coefficients for irrigation scheduling. *Irrigation Science* 24: 77-84.
- Ortega-Farías, S., López-Olivari, R., 2012. Validation of a two-layer model to estimate latent heat flux and evapotranspiration in a drip-irrigated olive orchard. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1169-1178.
- Oster, J.D., Wichelns, D., 2003. Economic and agronomic strategies to achieve sustainable irrigation. *Irrigation Sci.* 22, 107-120.
- Oster, J.D., Letey, J., Vaughan, P., Wu, L., Qadir, M., 2012. Comparison of transient state models that include salinity and matric stress effects on plant yield. *Agric. Water Manage.* 103, 167-175.
- Ozier-Lafontaine H., Vercambre G., Tournebize R., (1997). Radiation and transpiration partitioning in a maize-sorghum intercrop: Test and evaluation of two models. *Field Crops Research* 49, 127-145.

- Paço, T.A., 2003 Modelação da evapotranspiração em cobertos descontínuos—Programação da rega em pomar de pessegueiro. Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia (<http://purl.pt/6720>).
- Paço T.A., Ferreira M.I., Rosa R.D., Paredes P., Rodrigues G.C., Conceição N., Pacheco C.A., Pereira L.S., 2012. The dual crop coefficient approach using a density factor to simulate the evapotranspiration of a peach orchard: SIMDualKc model vs. eddy covariance measurements. *Irrig. Sci.* 30(2), 115-126.
- Paço T.A., Pôças I., Cunha M., Silvestre J.C., Santos F.L., Paredes P., Pereira L.S., 2014. Evapotranspiration and crop coefficients for a super intensive olive orchard. An application of SIMDualKc and METRIC models using ground and satellite observations. *J. Hydrol.* 519, 2067–2080.
- Palese, A.M., Nuzzo, V., Favati, F., Pietrafesa, A., Celano, G., Xiloyannisa, C., 2010. Effects of water deficit on the vegetative response, yield and oil quality of olivetrees (*Olea europaea* L., cv Coratina) grown under intensive cultivation. *Sci. Hor-tic.* 125 (3), 222–229.
- Palomo, M.J., Moreno, F., Fernandez, J.E., Diaz-Espejo, A., Giron, I.F., 2002. Determining water consumption in olive orchards using the water balance approach. *Agric. Water Manage.* 55 (1), 15–35.
- Pang, X.P., Letey, J., 1998. Development and evaluation of ENVIRO-GRO, an integrated water, salinity, and nitrogen model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 1418–1427.
- Paredes, P., Rodrigues, G.C., Alves, I., Pereira, L.S., 2014. Partitioning evapotranspiration, yield prediction and economic returns of maize under various irrigation management strategies. *Agric. Water Manage.* 135, 27– 39, and Corrigendum in *Agric. Water Manage.* 141, 84.
- Paredes, P.; Pereira, L.S.; Rodrigues, G.C.; Botelho, N.; Torres, M.O., 2017. Using the FAO dual crop coefficient approach to model water use and productivity of processing pea (*Pisum sativum* L.) as influenced by irrigation strategies. *Agric. Water Manage.* 189, 5–18, DOI:10.1016/j.agwat.2017.04.010.
- Paredes, P., D'Agostino, D., Assif, M., Todorovic, M., Pereira, L.S. 2018. Assessing potato transpiration, yield and water productivity under various water regimes and planting dates using the FAO dual Kc approach. *Agric Water Manag*, 195:11-24.
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. Lond., A*, 120-145.
- Pereira LS, 2004. Necessidades de Água e Métodos de Rega. Publ. Europa-América, Lisboa, 313 p.
- Pereira, L.S., Perrier, A., Ait Kadi, M., Kabat, P. (Eds.), 1992. Crop-Water Models. Special issue of the ICID Bulletin, ICID, New Delhi.
- Pereira, L.S., van den Broek, B.J., Kabat, P., Allen, R.G. (Eds.), 1995. Crop-Water Simulation Models in Practice. Wageningen Pers, Wageningen.
- Pereira, 2017. Water, agriculture and food: challenges and issues. *Water Resources Management*, 31:2985–2999.
- Pereira, L.S., Cai, L.G., Musy, A., Minhas, P.S., 2003. Water Saving in the Yellow River Basin: Issues and Decision Support Tools in Irrigation. China Agricultural Press, Beijing.
- Pereira, L.S., Gonçalves, J. M., Dong, B., Mao, Z., Fang, S. X., 2007. Assessing basin irrigation and scheduling strategies for saving irrigation water and controlling salinity in the upper Yellow River Basin, China. *Agric. Water Manage.* 93, 109-122.
- Pereira, L.S., Cordey, I., Iacovides, I., 2009. Coping with Water Scarcity. Addressing the Challenges. Springer.

- Pereira, L.S., Cordery, I., Iacovides, I., 2012. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agric. Water Manage.*, 108, 39–51.
- Pereira, L.S., Duarte, E., Fragoso R., 2014. Water use: recycling and desalination for agriculture. In: N. van Alfen (editor-in-chief), *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, Vol. 5, San Diego, Elsevier, pp. 407-424.
- Pereira L.S., Allen R.G., Smith M., Raes D., 2015a. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agric. Water Manage.* 147, 4-20.
- Pereira, L.S., Paredes, P., Rodrigues, G.C., Neves, M., 2015b. Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing AQUACROP and SIMDualKc models. *Agric. Water Manage.* 159, 239-254.
- Pereira L.S., Perrier, A., Allen, R.G., Alves, I., 1999. Evapotranspiration: Concepts and future trends. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 125(2), 45-51.
- Perez, P.J., Lecina, S., Castellvi, F., Martínez-Cob, A., Villalobos, F.J., 2006. A simple parameterization of bulk canopy resistance from climatic variables for estimating hourly evapotranspiration. *Hydrol. Process.*, 20, 515-532.
- Petillo, M.G., Castel, J.R., 2007. Water balance and crop coefficient estimation of a citrus orchard in Uruguay. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 5(2), 232-243.
- Peterschmitt, J.M., Perrier, A., 1991. Evapotranspiration and canopy temperature of rice and groundnut in southeast Coastal. India crop coefficient approach and relationship between evapotranspiration and canopy temperature. *Agric. Forest Meteorol.*, 56, 273-298.
- Piccinni, G., Ko, J., Marek, T., Howell, T., 2009. Determination of growth-stage specific crop coefficients (Kc) of maize and sorghum. *Agric. Water Manage.* 96, 1698–1704.
- Poblete-Echeverría, C., Ortega-Farias, S. 2009. Estimation of actual evapotranspiration for a drip-irrigated Merlot vineyard using a three-source model. *Irrig Sci*, 28, 65–78.
- Pôças, I., Paço, T.A., Cunha, M., Andrade, J.A., Silvestre, J., Sousa, A., Santos, F.L., Pereira, L.S., Allen, R.G., 2014. Satellite based evapotranspiration of a superintensive olive orchard: application of METRIC algorithm. *Biosyst. Eng.*
- Pôças I., Paço T.A., Paredes P., Cunha M., Pereira L.S., 2015. Estimation of actual crop coefficients using remotely sensed vegetation indices and soil water balance modelled data. *Remote Sens.* 2015, 7(3), 2373-2400
- Prueger, J.H., Hatfield, J.L., Aase, J.K., Pikul Jr., J.L., 1997. Bowen-Ration Comparisons with Lysimeter Evapotranspiration. *Agronomy Journal*, 89(5), 730-736.
- Qadir, M., Oster, J.D., 2004. Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and water aimed at environmentally sustainable agriculture. *Sci. Total Environ.* 323, 1-19.
- Qadir M., Quillérrou E., Nangia V., Murtaza G., Singh M., Thomas R.J., Drechsel P., Noble A.D., 2014. Economics of salt-induced land degradation and restoration. *Nat. Resour. Forum* 38, 282–295.
- Qi, J., Vermeer, P.A., Cheng, G., 2006. A Review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties. *Permafrost and Periglac. Process.* 17: 245–252.
- Qin, A.-Z., Huang, G.-B., Chai, Q., Yu, A.-Z., Huang, P., 2013. Grain yield and soil respiratory response to intercropping systems on arid land. *Field Crop. Res.* 144, 1–10
- Qiu, R., Du, T., Kang, S., Chen, R., Wu, L., 2015. Assessing the SIMDualKc model for estimating evapotranspiration of hot pepper grown in a solar greenhouse in Northwest China. *Agric. Syst.* 138: 1–9

- Raab, N., Meza, F.J., Franck, N., Bambach, N., 2015. Empirical stomatal conductance models reveal that the isohydric behavior of an *Acacia* caven Mediterranean Savannah scales from leaf to ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 213, 203-216.
- Raats, P.A.C., 1975. Distribution of salts in the root zone. *J. Hydrol.* 27, 237-248.
- Raats, P.A.C., 1981. Residence times of water and solutes within and below the root zone. *Agric. Water Manage.* 4, 63-82.
- Raes, D., 2002. BUDGET, a soil water and salt balance model: reference manual. K.U.Leuven, Belgium.
- Raes, D., Geerts, S., Kipkorir, E., Wellens, J., Sahli, A., 2006. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. *Agric. Water Manage.*, 81, 335-357.
- Ragab, R., 2002. A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: The Saltmed Model. *Env. Model. Software* 17, 345–361.
- Ragab, R.A., Amer, F., 1986. Estimating water table contribution to the water supply of maize. *Agric Water Manag.*, 11, 221-230.
- Ramos, T.B., Gonçalves, M.C., Castanheira, N.L., Martins, J.C., Santos, F.L., Prazeres, A., Fernandes, M.L., 2009. Effect of sodium and nitrogen on yield function of irrigated maize in southern Portugal. *Agric. Water Manage.* 96, 585-594.
- Ramos, T.B., Šimůnek, J., Gonçalves, M.C., Martins, J.C., Prazeres, A., Castanheira, N.L., Pereira, L.S., 2011. Field evaluation of a multicomponent solute transport model in soils irrigated with saline waters. *J. Hydrol.* 407, 129-144.
- Ramos, T.B., Castanheira, N.L., Gonçalves, M.C., Fernandes, M.L., Januário, M.I., Lourenço, M.E., Pires, F.P., Martins, J.C., 2012a. Effect of combined use of brackish water and nitrogen fertilizer on biomass and sugar yield of sweet sorghum. *Pedosphere* 22, 785-794.
- Ramos, T.B., Šimůnek, J., Gonçalves, M.C., Martins, J.C., Prazeres, A., Pereira, L.S., 2012b. Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters. *Agric. Water Manage.* 111, 87-104.
- Ran H, S Kang, F Li, L Tong, R Ding, T Du, S Li, X Zhang, 2017. Performance of AquaCrop and SIMDualKc models in evapotranspiration partitioning on full and deficit irrigated maize for seed production under plastic film-mulch in an arid region of China. *Agricultural Systems*, 151, 20–32
- Rana, G., Katerji, N., 2000. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy*. 13: 125-153.
- Rana, G., Katerji, N., de Lorenzi, F., 2005. Measurement and modelling of evapotranspiration of irrigated citrus orchard under Mediterranean conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 128, 199-209.
- Rana, G., Katerji, N., Mastrorilli, M., El Moujabber, M., 1994. Evapotranspiration and Canopy Resistance of Grass in a Mediterranean Region. *Theor. Appl. Climatol.*, 50, 61-71.
- Rana, G., Katerji, N., Mastorilli, M., El-Moujabber, M., 1997a. A model for predicting actual evapotranspiration and canopy resistance of grass in a Mediterranean region. *Theor. And App. Climatology*, 56(1-2), 45-55.
- Rana, G., Katerji, N., Mastrorilli, M., El Moujabber, M., Brisson, N., 1997b. Validation of a model of actual evapotranspiration for water stresses soybeans. *Agric. Forest Meteorol.*, 86, 215-224.
- Rana, G., Katerji, N., Perniola, M., 2001. Evapotranspiration of sweet sorghum: a general model and multilocal validity in semiarid environmental conditions. *Water Resour. Res.*, 37(12), 3237-3246.

- Raz-Yaseef, N., Rotenberg, E., Yakir, D., 2010. Effects of spatial variations in soil evaporation caused by tree shading on water flux partitioning in a semi-arid pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 454-462.
- Rhoades, J.D., Kandiah, A., Mashali, A.M., 1992. The use of saline water for crop production. *Irrig. Drain. Pap.* 48, FAO, Rome.
- Rhoades, J.D., Chanduvi, F., Lesch, S., 1999. Soil Salinity Assessment. Methods and Interpretation of Electrical Conductivity Measurements. *Irrig. Drain. Paper* 57, FAO Rome.
- Ritchie, J.T., 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.* 8, 1204-1213.
- Rochette, P., Pattey, E., Desjardins, R.L., Dwyer, L.M., Stewart, D.W., Dubé, P.A., 1991. Estimation of maize (*Zea mays* L.) canopy conductance by scaling up leaf stomatal conductance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 54, 241-261.
- Rodrigues, G.C., Pereira, L.S., 2009. Assessing economic impacts of deficit irrigation as related to water productivity and water costs. *Byosist Eng.* 103(4): 536-551.
- Rosa, R.D., Paredes, P., Rodrigues, G.C., Alves, I., Allen, R.G., Pereira, L.S., 2012a. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. *Agric. Water Manage.* 103: 8-24
- Rosa, R.D., Paredes, P., Rodrigues, G.C., Fernando, R.M., Alves, I., Allen, R.G., Pereira, L.S., 2012b. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software: 2. Model testing. *Agric. Water Manage.* 103: 62-77.
- Rosa, R.D., Ramos, T.B., Pereira L.S. 2016. The dual Kc approach to assess maize and sweet sorghum transpiration and soil evaporation under saline conditions: Application of the SIMDualKc model. *Agric. Water Manage.*, 177: 77-94.
- Rousseaux, M.C., Figuerola, P.I., Correa-Tedesco, G., Searles, P.S., 2009. Seasonal variations in sap flow and soil evaporation in an olive (*Olea europaea* L.) grove under two irrigation regimes in an arid region of Argentina. *Agric. Water Manage.*, 96, 1037-1044.
- Sánchez, J.M., Kustas, W.P., Caselles, V., Anderson, M.C. 2008. Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote Sensing of Environment* 112 (3): 1130-1143.
- Saugier, B., Granier, A., Pontallier, J.Y., Dufrêne, E. & Baldocchi, D., 1997. Transpiration of a boreal pine forest measured by branch bag, sap flow and micrometeorological methods. *Tree Physiology*, 17, 511-519.
- Savage M.J. 2009. Estimation of evaporation using a dual-beam surface layer scintillometer and component energy balance measurements. *Agric. Forest Meteorol.* 149, 501-517
- Sánchez, J.M., López-Urrea, R., Rubio, E., González-Piqueras, J., Caselles, V., 2014. Assessing crop coefficients of sunflower and canola using two-source energy balance and thermal radiometry. *Agric. Water Manage.* 137: 23–29
- Shahrokhnia, M.H., Sepaskhah, A.R., 2013. Single and dual crop coefficients and crop evapotranspiration for wheat and maize in a semi-arid region. *Theor. Appl. Climatol.*, 114, 495-510
- Shani, U., Ben-Gal, A., Tripler, E., Dudley, L.M., 2007. Plant response to the soil environment: An analytical model integrating yield, water, soil type, and salinity. *Water Resour. Res.* 43, W08418, doi: 10.1029/2006WR005313.
- Sharma, B.R., Minhas, P.S., 2005. Strategies for managing saline/alkali waters for sustainable agricultural production in South Asia. *Agric. Water Manage.* 78, 136–151.
- Shi, T.T., Guan, D.X., Wu, J.B., Wang, A.Z., Jin, C.J., Han, S.J., 2008. Comparison of methods for estimating evapotranspiration rate of dry forest canopy: Eddy covariance,

- Bowen ratio energy balance, and Penman-Monteith equation. *Journal of Geophysical Research*, 113, 1-15.
- Schüttlemeyer, D., Moene, A.F., Holtslag, A.A.M., De-Bruin, H.A.R., Van De Giesen, N., 2006. Surface Fluxes and Characteristics of Drying Semi-Arid Terrain in West Africa. *Boundary-Layer Meteorology*, 118, 583–612
- Sepaskhah, A.R., Kannoni, A., Ghasemi, M.M., 2003. Estimating water table contributions to corn and sorghum water use. *Agric. Water Manage.*, 58, 67-79.
- Shuttleworth, W.J., 2006. Towards One-Step Estimation of Crop Water Requirements. *Transactions of the ASABE*, 49(4), 925-935
- Shuttleworth, W.J., 2008. Evapotranspiration Measurement Methods. *Southwest Hydrology*, January/February, 22-23.
- Shuttleworth, W.J. and Wallace, J.S., 1985. Evaporation from sparse crops - an energy combination theory. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 111, 839-855.
- Sillanpää, M., Webber, L.R., 1961. The effect of freezing-thawing and wetting-drying cycles on soil aggregation. *Can. J. Soil. Sci.* 41(2): 182-187
- Šimůnek, J., Hopmans, J.W., 2009. Modeling compensated root water and nutrient uptake. *Ecol. Model.* 220, 505-521.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th., Šejna, M., 2008. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes. *Vadose Zone J.* 7, 587-600.
- Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M.Th., 2013. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media: Version 4.16. Dep. Environ. Sci., University of California, Riverside.
- Skaggs, T.H., Trout, T.J., Šimůnek, J., Shouse, P.J., 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *J. Irrig. Drain. Engineer.* 130, 304-310.
- Skaggs, T.H., van Genuchten, M.Th., Shouse, P.J., Poss, J.A., 2006a. Macroscopic approaches to root water uptake as a function of water and salinity stress. *Agric. Water Manage.* 86, 140-149.
- Skaggs, T.H., Shouse, P.J., Poss, J.A., 2006b. Irrigating forage crops with saline waters: 2. Modeling root uptake and drainage. *Vadose Zone J.* 5, 824-837.
- Skaggs, T.H., Anderson, R.G., Corwin, D.L., Suarez, D.L., 2014. Analytical steady-state solutions for water-limited cropping systems using saline irrigation water. *Water Resour. Res.* 50: 1944-7973
- Song, Y.N., Zhang, F.S., Marschner, P., Fan, F.L., Gao, H.M., Bao, X.G., Sun, J.H., Li, L., 2007. Effect of intercropping on crop yield and chemical and microbiological properties in rhizosphere of wheat (*Triticum aestivum* L.), maize (*Zea mays* L.), and faba bean (*Vicia faba* L.). *Biol Fertil Soils* 43:565–574
- Spano, D., Snyder, R.L., Duce, P., U, K.T.P., 2000. Estimating sensible and latent heat flux densities from grapevine canopies using surface renewal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 104, 171-183.
- Sperling, O., Shapira, O., Tripler, E., Schwartz, A., Lazarovitch, N., 2014. A model for computing date palm water requirements as affected by salinity. *Irrig. Sci.* 32, 341-350.
- Stannard, D.I., Weltz, M.A., 2006. Partitioning evapotranspiration in sparsely vegetated rangeland using a portable chamber. *Water Resources Research*, 42, W02413, doi:10.1029/2005WR004251.

- Steduto, P., Caliendo, A., Rubino, P., Mechlia, N.B., 1996. Penman-Monteith reference evapotranspiration estimates in the Mediterranean region. In: Proceedings of International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. pp. 357–364.
- Steduto, P., Çetinkökü, Ö., Albrizio, R., Kanber, R., 2002. Automated closed-system canopy-chamber for continuous field-crop monitoring of CO₂ and H₂O fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111, 171-186.
- Steduto, P., Katerji, N., Puertos-Molina, H., Unlü, M., Mastrorilli, M., Rana, G., 1997. Water-use efficiency of sweet sorghum under water stress conditions. Gas-exchange investigations at leaf and canopy scales. *Field Crop. Res.* 54, 221-234.
- Steduto, P., Todorovic, M., Caliendo, A., Rubino, P., 2003. Daily ETo estimates by the Penman-Monteith equation in Southern Italy. Constant vs. variable canopy resistance. *Theor. Appl. Climatol.* 74, 217–225.
- Stewart, J., 1988. Modelling surface conductance of pine forest. *Agric. For. Meteorol.*, 43, 19-35.
- Stewart, J.I., Hagan, R.M., Pruitt, W.O., Danielson, R.E., Franklin, W.T., Hanks, R.J., Riley, J.P., Jackson, E.B., 1977. Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil. Reports Paper 67, Utah Water Research Laboratory, Logan, 191 pp.
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Europ. J. Agronomy*, 18, 289-307.
- Stroosnijder, L., 1987. Soil evaporation: test of a practical approach under semi-arid conditions. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 35, 417-426.
- Summer, D.M., Jacobs, J.M., 2005. Utility of Penman–Monteith, Priestley–Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 308, 81-104.
- Sutanto, S.J., Wenninger, J., Coenders-Gerrits, A.M. J., Uhlenbrook, S., 2012. Partitioning of evaporation into transpiration, soil evaporation and interception: a comparison between isotope measurements and a HYDRUS-1D model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 2605-2616.
- Szumigalski, R., Van Acker, R.C., 2006. Nitrogen yield and land use efficiency in annual sole crops and intercrops. *Agronomy J.*, 98, 1030-1040.
- Tanner, C. B., and W. A. Jury, 1976: Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover. *Agron. J.*, 68, 239–242.
- Testi, L., Villalobos, F.J., Orgaz, F., 2004. Evapotranspiration of a young irrigated olive orchard in southern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121, 1-18.
- Testi, L., Villalobos, F.J., Orgaz, F., Fereres, E., 2006. Water requirements of olive orchards: I simulation of daily evapotranspiration for scenario analysis. *Irrig. Sci.*, 24, 69-76
- Tian F, Yang P, Hu H, Dai C. 2016. Partitioning of cotton field evapotranspiration under mulched drip irrigation based on a dual crop coefficient model. *Water*. 8:72, doi:10.3390/w8030072
- Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R., Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418, 671-677.
- Todd, R.W., Klocke, N.L., Hergert, G.W., Parkhurst, A.M., 1991. Evaporation from soil influenced by crop shading, crop residue, and wetting regime. *Transactions of the ASAE*, 34(2), 461-466.
- Todd, R.W., Evett, S.R., Howell, T.A., 2000. The Bowen-ratio energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(3), 335-348.

- Todorovic, M., 1999. Single-layer evapotranspiration model with variable canopy resistance. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, 125(5), 235-245.
- Todorovic, M., Steduto, P., 2003. A GIS for irrigation management. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28, 163–174.
- Tolk, J. A., Howell, T. A., 2001. Measured and simulated evapotranspiration of grain sorghum grown with full and limited irrigation in three high plains soils. *Trans. ASAE* 44, 1553–1558.
- Tsubo, M., Walker, S., Mukhala, E. 2001. Comparisons of radiation use efficiency of mono-/inter-cropping systems with different row orientations. *Field Crop. Res.*, 71, 17-29.
- Tyagi, N.K., Sharma, D.K., Luthra, S.K., 2000. Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter. *Agric Water Manage.*, 45, 41-54.
- U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils; Handbook No. 60*, US Salinity Laboratory, USDA-ARS, Riverside CA.
- USDA-SCS, 1972. *National Engineering Handbook*, Section 4, Table 10.1
- van Dam, J.C., J. Huygen, J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat, P.E.V. van Walsum, P. Groenendijk and C.A. van Diepen, 1997. Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment. Wageningen Agricultural University and DLO Winand Staring Centre. Technical Document 45.
- van Genuchten, M.Th., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.
- van Genuchten, M.Th., 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Res. Rep. 121, US Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.
- van Genuchten, M.Th., Gupta, S.K., 1993. A reassessment of the crop tolerance response function, *J. Indian Soc. Soil Sci.* 41, 730–737.
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Heng, L.K., Vila, M.G., Moreno, P.M., 2014. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield assessment model. *Environ. Model Soft.* 62, 351-360.
- Ventura, F., Spano, D., Duce, P., Snyder, R.L., 1999. An evaluation of common evapotranspiration equations. *Irrig. Sci.*, 18, 163–170.
- Villalobos, F.J., Orgaz, F., Testi, L., Fereres, E. 2000. Measurement and modeling of evapotranspiration of olive (*Olea europaea* L.) orchards. *Eur J Agron* 13:155-163
- Wallender, W.W., Tanji, K.K. (Eds.), 2012. *Agricultural Salinity Assessment and Management*, 2nd ed. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No.71. ASCE, New York.
- Wang, L-P., Akae, T., 2004. Analysis of ground freezing process by unfrozen water content obtained from TDR data in Hetao Irrigation District of China. *J Jpn Soc Soil Phys* 98:11–19
- Wang L., Caylor, K.K., Villegas, J.C., Barron-Gafford, G.A., Breshears, D.D., Huxman, T.E., 2010. Partitioning evapotranspiration across gradients of woody plant cover: Assessment of a stable isotope technique. *Geophysical Research Letters*, 37, L09401, doi:10.1029/2010GL043228.
- Wang, X., Williams, J.R., Gassman, P.W., Baffaut, C., Izaurralde, R.C., Jeong, J., Kiniry, J.R., 2012. EPIC and APEX: model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55, 1447-1462

- Wang, Z. Li, J., Li. Y., 2014. Simulation of nitrate leaching under varying drip system uniformities and precipitation patterns during the growing season of maize in the North China Plain. *Agric. Water Manage.* 142, 19-28.
- Wang, Z-G., Bao, X-G., Li, X-F., Jin, X., Zhao, J-H., Sun, J-H., Christie, P., Li, L., 2015. Intercropping maintains soil fertility in terms of chemical properties and enzyme activities on a timescale of one decade. *Plant Soil*, 391:265–282
- Wei, Z., Paredes, P., Liu, Y., Chi, W.W., Pereira, L.S., 2015. Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soybean in North China Plain. *Agric. Water Manage.* 147, 43–53.
- Whitley, R., Medlyn, B., Zeppel, M., Macinnis-Ng, C., Eamus, D., 2009. Comparing the Penman–Monteith equation and a modified Jarvis–Stewart model with an artificial neural network to estimate stand-scale transpiration and canopy conductance. *Journal of Hydrology*, 373, 256-266.
- Williams, L.E., Ayars, J.E., 2005. Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132, 201–211.
- Williams, D.G., Cable, W., Hultine, K., Hoedjes, J.C.B., Yepez, E.A., Simonneaux, V., Er-Raki, S., Boulet, G., de Bruin, H.A.R., Chehbouni, A., Hartogensis, O.K., Timouk, F., 2004. Evapotranspiration components determined by stable isotope, sapflow and eddy covariance techniques. *Agricultural and Forest Meteorology*, 125, 241-258.
- Wilson, K.B., Hanson, P.J. Mulholland, P.J., Baldocchi D.D., Wullschleger S.D., 2001. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106, 153-168.
- Wolf, A., Saliendra, N., Akshalov, K., Johnson, D.A., Laca, E., 2008. Effects of different eddy covariance correction schemes on energy balance closure and comparisons with the modified Bowen ratio system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 48, 942-952.
- Wright, J.L., 1991. Using Weighing Lysimeters to Develop Evapotranspiration Crop Coefficients. *Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements*, HI/July, 23-25.
- Wright, J.L., Allen, R.G., Howell, T.A., 2000. Conversion between evapotranspiration references and methods. In: *Proceedings of fourth Decennial National Irrigation Symposium*, Phoenix, AZ, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 251–259.
- Wu Q, Christen EW, Enever D (1999) Basinman-A water balance model for farms with subsurface pipe drainage and on-farm evaporation basins. CSIRO Land and Water, Griffith, NSW, Australia, Technical Report 1/99.
- Wu, JW, Vincent, B, Yang, JZ, Bouarfa, S, Vidal, A, 2008. Remote sensing monitoring of changes in soil salinity: a case study in Inner Mongolia, China. *Sensors* 8(11):7035–7049
- Wu, Y., Liu, T., Paredes, P., Duan, L., Pereira, L.S., 2015a. Water use by a groundwater dependent maize in a semi-arid region of Inner Mongolia: evapotranspiration partitioning and capillary rise. *Agric. Water Manage.* 152: 222–232.
- Wu Y., Liu T., Paredes P., Duan L., Wang H., Wang T., Pereira L.S., 2015b. Ecohydrology of groundwater-dependent grasslands of the semi-arid Horqin sandy land of inner Mongolia focusing on evapotranspiration partition. *Ecohydrol.* DOI: 10.1002/eco.1702.
- Wythers, K.R., Lauenroth, W.K., Paruelo, J.M., 1999. Bare-Soil Evaporation Under Semi-Arid Field Conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 1341-1349.

- Xu, X., Huang, G.H., Qu, Z.Y., Pereira, L.S., 2010. Assessing the groundwater dynamics and predicting impacts of water saving in the Hetao Irrigation District, Yellow River basin. *Agric. Water Manage.* 98, 301-313
- Xu, X., Huang, G.H., Qu, Z.Y., Pereira, L.S., 2011. Using MODFLOW and GIS to assess changes in groundwater dynamics in response to water saving measures in irrigation districts of the upper Yellow River basin. *Water Resour. Manage.* 25, 2035-2059
- Xu, X., Huang, G., Sun, C., Pereira, L.S., Ramos, T.B., Huang, Q., Hao, Y., 2013. Assessing the effects of water table depth on water use, soil salinity and wheat yield: Searching for a target depth for irrigated areas in the upper Yellow River basin. *Agric. Water Manage.* 125, 46-60
- Yang, C.H., Chai, Q., Huang, G.B., 2010. Root distribution and yield responses of wheat/maize intercropping to alternate irrigation in the arid areas of northwest China. *Plant Soil Environ.*, 56 (6): 253-262
- Yang, C., Huang, G., Chai, Q., Luo, Z., 2011. Water use and yield of wheat/maize intercropping under alternate irrigation in the oasis field of northwest China. *Field Crop. Res.* 124, 426-432
- Yang, Y., Shang, S., Jiang, L., 2012. Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of North China. *Agric. Forest Meteorol.* 164: 112- 122
- Yang, J., Wan, S., Deng, W., Zhang, G., 2007. Water fluxes at a fluctuating water table and groundwater contributions to wheat water use in the lower Yellow River flood plain, China. *Hydrol. Process.*, 21, 717-724.
- Yao, H., Hashino, M., Terakawa, A., Susuki, T., 1998. Comparison of distributed and lumped hydrological models. *Annual Journal of Hydrological Engineering*, 42, 163-168.
- Yin, W., Chai, Q., Hu, F., Yu, A., 2013. Yield performance and water use of Wheat/Maize intercropping under stubble mulch and reduced tillage in an Oasis Region. In: 4th International Symposium for Farming Systems Design, Lanzhou, China, pp 51-52 (www.fsd2013.com)
- Yu, L.-P., Huang, G., Liu, H.-J, Wang, X.-P., Wang, M.-Q., 2009. Experimental investigation of soil evaporation and evapotranspiration of winter wheat under sprinkler irrigation. *Agricultural Sciences in China* 8(11): 1360-1368
- Yu, R., Liu, T., Xu, Y., Zhu, C., Zhang, Q., Qu, Z., Liu, X., Li, C., 2010. Analysis of salinization dynamics by remote sensing in Hetao Irrigation District of North China. *Agric. Water Manage.* 97: 1952-1960
- Yunusa, I. A. M., Walker, R. R., Guy, J. R., 1997. Partitioning of seasonal evapotranspiration from a commercial furrow-irrigated Sultana vineyard. *Irrig Sci* (1997) 18: 45-54.
- Zaccaria, D., Lamaddalena, N., Neale, C.M. U., Merkley, G.P., 2013. Simulation of peak-demand hydrographs in pressurized irrigation delivery systems using a deterministic-stochastic combined model. Part II: model applications. *Irrig Sci*, 31:193-208.
- Zhang, F., Li, L., 2003. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency. *Plant and Soil* 248, 305-312
- Zhang, F.C., Wang, R.L., Han, F.Y., Fu, Y.S., Liu, G.L., Xu, Y.G., Han, D.S. (2000). High quality and high yield maize variety Badan 3, *Journal of Maize Science*. 8(1), 44-45 (in Chinese)

- Zhang, K., Hilton, H.W., Greenwood, D.J., Thompson, A.J., 2011a. A rigorous approach of determining FAO56 dual crop coefficient using soil sensor measurements and inverse modeling techniques. *Agric. Water Manage.* 98: 1081–1090
- Zhang, B., Kang, S., Li, F., Zhang, L., 2008. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 1629-1640.
- Zhang, Z., Tian, F., Hu, H., Yang, P., 2014. A comparison of methods for determining field evapotranspiration: photosynthesis system, sap flow, and eddy covariance. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 1053-1072.
- Zhang, L., Wang, G., Zhang, E., Zhang, B., He, C., Wang, Q., Qiang, S., Huang, G., 2011b. Effect of phosphorus application and strip intercropping on yield and some wheat-grain components in a wheat/maize/potato intercropping system. *Afr. J. Agric. Res.* 6, 5860-5869
- Zhang, B., Liu, Y., Xu, D., Zhao, N., Lei, B., Rosa, R. D., Paredes, P., Paço, T. A., Pereira, L. S. 2013. The dual crop coefficient approach to estimate and partitioning evapotranspiration of the winter wheat–summer maize crop sequence in North China Plain. *Irrig. Sci.*, 31, 1303-1316.
- Zhao, X., Liu, Y., Tanaka, H., Hiyama, T., 2010. A Comparison of Flux Variance and Surface Renewal Methods With Eddy Covariance. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3(3), 345-350.
- Zhao, N., Liu, Y., Cai, J., Paredes, P., Rosa, R.D., Pereira, L.S., 2013. Dual crop coefficient modelling applied to the winter wheat - summer maize crop sequence in North China Plain: basal crop coefficients and soil evaporation component. *Agric. Water Manage.* 117, 93–105
- Zhao, P., Li, S., Li, F., Du, T., Tong, L., Kang, S., 2015. Comparison of dual crop coefficient method and Shuttleworth–Wallace model in evapotranspiration partitioning in a vineyard of northwest China. *Agric. Water Manage.* 160, 41–56.
- Zheng, H.X., Shi, H.B., Cheng, M.J., Zhu, M., Gonçalves J.M. (2010). Irrigation schedule design of intercrop wheat and maize by ISAREG model. *Journal of Irrigation and Drainage*, 29(2), 89-94 (in Chinese).
- Zhiming F., Dengwei, L., Yuehong, Z., 2007. Water Requirements and Irrigation Scheduling of Spring Maize Using GIS and CropWat Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region. *Chinese Geographical Science*, 17(1), 056–063.
- Zhu, Z., Giordano, M., Cai, X., Molden, D., Hong S., Zhang H., Lian Y., Li H., Zhang X., Zhang X., Xue Y. (2003). Yellow river comprehensive assessment: Basin features and issues.). Working Paper 57, IWMI, Colombo, 26 p.
- Zhu, L., Shi, H.-B., Wang, N., Li, Y.-Y., Li, Z.-Z., Tuo, Y., 2012. Research on crop water requirement and optimization of irrigation system of intercrop wheat and sunflower. *China Rural Water and Hydropower* 2012(4), 64-67 (in Chinese)